**Dottorato di Ricerca in**

**Materiali e innovazione tecnologica per l'ingegneria e l'architettura**

**(XXIV Ciclo)**

**Coorinatore: Prof. Arch. Carlo Truppi**

# SVILUPPO DI MATERIALI COMPOSITI RINFORZATI CON FIBRE NATURALI PER L'INGEGENRIA CIVILE


***Dottorando : Ing. Giuseppe Cristaldi***

***Tutor: Prof. Ing. Gianluca Cicala***


**2008-2011**

# INDICE

**CAPITOLO 1.** I MATERIALI COMPOSITI A MATRICE POLIMERICA

## CAPITOLO 2. I PROCESSI DI PRODUZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI



## CAPITOLO 3. PROGETTARE CON I MATERIALI COMPOSITI

**CAPITOLO 4.** PARTE SPERIMENTALE

CAPITOLO 1

# I MATERIALI COMPOSITI A MATRICE POLIMERICA

## 1.1 L’IMPORTANZA DEI MATERIALI COMPOSITI

Molte tecnologie moderne richiedono l'impiego di materiali che offrano peculiari combinazioni di diverse proprietà che non sono presenti contemporaneamente nei materiali tradizionali. Quanto affermato è particolarmente vero per i materiali impiegati nelle applicazioni aerospaziali, sottomarine e nell'industria dei trasporti, a cui si richiede soprattutto una bassa densità, ma elevata resistenza, rigidezza, resistenza all'abrasione ed all'impatto. Generalmente i materiali maggiormente resistenti sono anche quelli più densi. Inoltre, l'aumento di resistenza e della rigidezza di un materiale porta spesso anche a una diminuzione della capacità di resistenza agli impatti.

Oggi al progettista si presenta, in corso di progettazione, un campo di possibilità sempre più ampio e crescente in cui le scelte dei materiali e dei processi di trasformazione possono combinarsi dando luogo a quella che è stata definita iperscelta: per un dato prodotto non c'è più un solo materiale che si impone come scelta quasi obbligata; esistono, invece, diversi materiali in concorrenza tra di loro. Solo un'analisi approfondita e allargata anche all'intero processo produttivo ed alla vita successiva del prodotto può portare a individuare la soluzione ottimale.

Il punto di arrivo della ricerca di prestazioni complesse e sempre più vicine a un campo di impiego particolare è il materiale su misura, il materiale appositamente messo a punto per un determinato impiego: non si tratta più di scegliere un materiale, ma di progettare il materiale.

Sarà quindi un materiale che non esiste prima dell'oggetto in cui deve integrarsi, ma solo a valle della sua produzione come costituente del prodotto finito. I materiali compositi si inseriscono in questa categoria di materiali da progettare di cui probabilmente rappresentano l'archetipo.

Con il termine "composito" in generale si intende un materiale ottenuto combinando due o più componenti in modo che il prodotto finale abbia proprietà diverse da quelle dei singoli costituenti. In particolare, un materiale composito può essere definito come l'unione, per adesione o coesione, di due o più componenti, differenti per forma e composizione chimica, insolubili l'uno nell'altro e separati da un'interfaccia [1].

Il concetto di materiale composito è molto antico, basti pensare all'usanza di mescolare paglia e fango per ottenere un materiale da costruzione oppure ad uno dei materiali oggi più utilizzati in ambito civile: il cemento armato, ossia l'unione fra il calcestruzzo (di per sé già un composito) e l'acciaio. Materiali compositi complessi sono largamente presenti in natura: nel legno delle piante, un polimero di natura fibrosa, la cellulosa, è tenuta assieme da sostanze cementanti, come la lignina; nelle ossa degli animali il tessuto connettivo contiene particelle di idrossiapatite.

I compositi sono generalmente costituiti da una fase continua (detta matrice) e da una discontinua (che viene detta rinforzo anche se la sua funzione non è sempre quella di rinforzare). Alla seconda sono principalmente demandate le proprietà meccaniche del materiale (resistenza e rigidezza), la prima, invece, aderendo alle fibre permette di trasferire i carichi esterni applicati. Questa trasmissione avviene per effetto di tensioni tangenziali. Inoltre, la matrice oltre a stabilizzare a compressione il composito, ha la funzione di tenere insieme e proteggere le fibre e di realizzare la forma del pezzo [2]. In definitiva, un materiale composito è un materiale multifase che può essere creato artificialmente e diverso dai costituienti: in base al principio delle azioni combinate, l'ottimizzazione di una proprietà viene ottenuta mediante l'attenta e studiata combinazione di due o più materiali differenti a costo anche di peggiorarne alcune altre.

Le matrici possono essere di tipo polimerico (*PMC's Polymer Matrix Composites*), metallico o ceramico [14]. Tale distinzione, ancor prima che per motivi costruttivi o meccanici, si rende tanto più utile quanto più si risentono gli effetti della temperatura di esercizio [3,4]. La matrice, infatti, deve poter rimanere allo stato solido e non viscoso per poter assicurare una certa tenuta tra le fibre di rinforzo. A tal proposito si può fare riferimento al seguente schema:

***Tab.1.1*** *Classi di matrici*

| MATRICE | Temperatura massima di esercizio |
| --- | --- |
| *Polimerica* | *<250 °C* |
| *Metalllica* | *< 1000 °C* |
| *Ceramica* | *> 1000 °C* |

I rinforzi possono essere di tipo particellare o fibroso. Il rinforzo fibroso solitamente viene aggiunto alle matrici polimeriche allo scopo di rinforzare la matrice; il rinforzo di tipo particellare viene utilizzato spesso come riempitivo e/o stabilizzante.

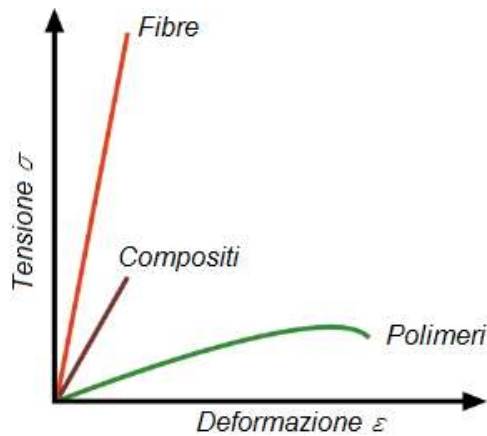



***Fig. 1.1*** *Principio delle azioni combinate per la resistenza meccanica di un materiale composito a matrice polimerica*

Il rinforzo può essere costituito da fibre discontinue, se le fibre sono di lunghezza confrontabile con quella dell'elemento di struttura che compongono, o da fibre continue se sono lunghe e continue per tutta la lunghezza a disposizione (Fig. 1.2).

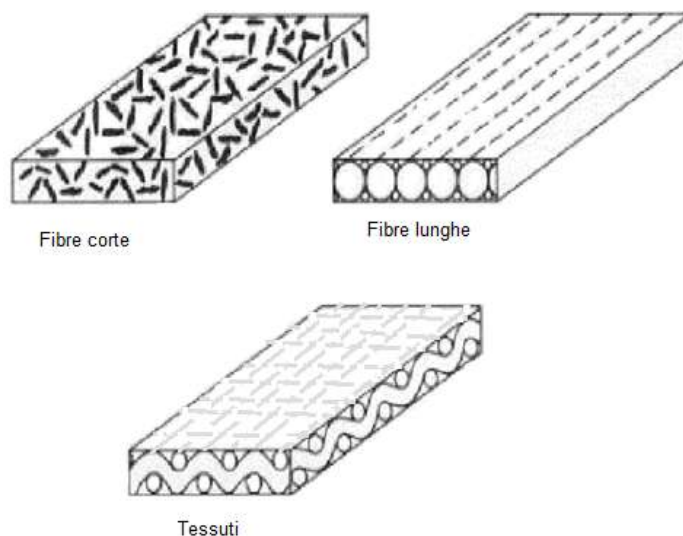



***Fig.1.2*** *In senso orario: compositi con fibre corte (whiskers) disposte casualmente; con fibre lunghe unidirezionali; con tessuti multidirezionali.*

Nel caso che le fibre siano disposte parallelamente tra loro nella matrice, si parla di compositi unidirezionali e si ottengono proprietà meccaniche del materiale spiccatamente anisotrope: questa è la caratteristica peculiare dei compositi in quanto offre la possibilità di progettare e costruire un materiale in funzione delle esigenze strutturali.

# 1.2 MATRICI POLIMERICHE

Un polimero (dal greco "molte parti") è una macromolecola, ovvero una molecola dall'elevato peso molecolare, costituita da un gran numero di piccole molecole (i monomeri) uguali o diverse (copolimeri) unite a catena mediante la ripetizione dello stesso tipo di legame. Esempi di monomeri possono essere il cloruro di vinile o l'etene: il primo dà origine al cloruro di polivinile, altrimenti detto polivinilcloruro, PVC, il secondo al polietilene detto anche politene.

Le matrici polimeriche possono essere classificate in funzione di diversi criteri [4]:

- Natura delle materie prime (naturali, sintetiche, parzialmente sintetiche);
- Natura delle unità fondamentali (omo- o copolimeri)
- Meccanismo di polimerizzazione (addizione, condensazione);
- Peso molecolare;
- Tatticità (isotattiche, atattiche, sindiotattiche);
- Organizzazione strutturale (amorfe, cristalline, semicristalline);

- Temperatura di transizione vetrosa (polimeri gommosi, vetrosi);
- Comportamento al calore (temoplastici, termoindurenti).

Generalmente si suole raggruppare le matrici in relazione all'ultimo criterio, ossia vengono identificate due classi di matrici: termoplastiche e termoindurenti.

### 1.2.1 TERMOPLASTICHE

I polimeri termoplastici [1,2,7] sono un gruppo di materie plastiche che acquistano malleabilità, cioè rammolliscono, sotto l'azione del calore. In questa fase possono essere modellate o formate in oggetti finiti e quindi per raffreddamento tornano ad essere rigide [15,16]. Questo processo, teoricamente, può essere ripetuto più volte in base alle qualità delle diverse materie plastiche; nella pratica è possibile ripetere il ciclo per un numero limitato di volte poiché troppi riscaldamenti possono degradare i polimeri.

I polimeri termoplastici [17,18] sono a struttura molecolare lineare e durante lo stampaggio a caldo non subiscono alcuna modificazione chimica. Il calore provoca solamente la fusione e la solidificazione avviene durante il raffreddamento. Esistono due classi di polimeri: quelli totalmente amorfi ed i semicristallini. I polimeri amorfi sono composti da catene disposte casualmente e si caratterizzano per una transizione (temperatura di transizione vetrosa $T_g$) durante la quale passano dallo stato fragile, tipico dei vetri, a quello simile alle gomme. In tali polimeri la fusione del materiale non avviene ad una determinata temperatura Tm; pertanto non esiste un preciso punto di fusione ma invece il materiale passa gradualmente dallo stato solido, attraverso quello viscoso, allo stato fluido. E' durante questo intervallo che i materiali vengono lavorati e trasformati: il ritiro di stampaggio è contenuto tra lo 0,3% e lo 0,9%.

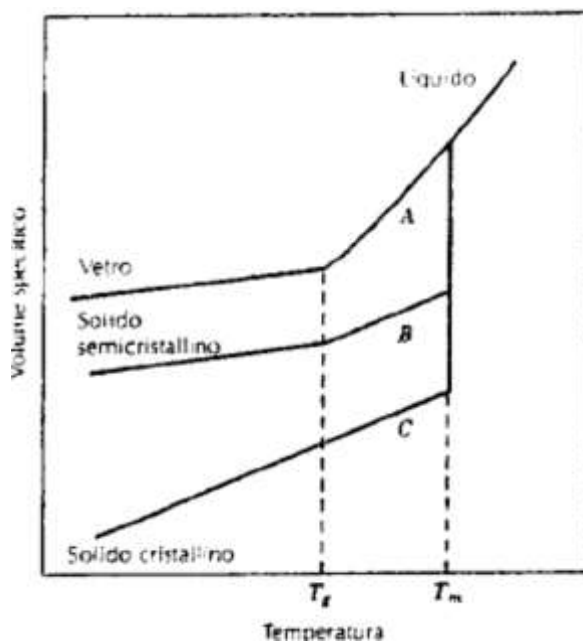



***Fig.1.3*** *Andamento del volume specifico in funzione della temperatura per polimeri amorfi, semicristallini e cristallini*

I polimeri semicristallini sotto la temperatura di fusione $T_m$, sono formati da regioni amorfe e cristalline. L'intervallo utile per la lavorazione è limitato a pochi gradi centigradi poiché al di sotto del punto di fusione il materiale è ancora solido mentre non è prudente superare di molto la temperatura di fusione dato che si possono innescare fenomeni di degradazione termica.

Questi polimeri presentano ritiri molto più alti di quelli relativi ai materiali amorfi e si aggirano intorno al 1% - 5%. Inoltre rispetto ai termoplastici amorfi, sono materiali più resistenti all'attacco chimico (sostanze acide, basiche, solventi ecc.).

Le regioni amorfe si comportano come i polimeri amorfi, mentre le regioni cristalline, sono aggregati di cristalliti, catene piegate, usualmente sotto forma di sferuliti. Le dimensioni degli sferuliti influenzano le proprietà meccaniche e di diffusione dei polimeri. La percentuale di cristallinità, il numero e le dimensioni degli sferuliti dipendono molto dalla temperatura di cristallizzazione e dalla orientazione macromolecolare durante la cristallizzazione.

I valori di $T_g$ e $T_m$ in relazione alla temperatura ambientale permettono la seguente classificazione:

- *elastomeri*, cioè polimeri reticolati o regioni microcristalline, la cui Tg è tale che soddisfa la relazione:

$$T_g + 75°C \leq T_{ambiente}$$

- *polimeri vetrosi*, ovvero sostanze amorfe la cui $T_g$ risulta

$$T_g \geq T_{ambiente} + 75°C$$

- *polimeri semicristallini*, sono i polimeri con cristallinità fra il 50% e il 90% la cui $T_g$ è molto sotto la $T_m$ e molto più alta della $T_{ambiente}$
- *polimeri cristallini*, con cristallinità superiore al 90%.

Importanti sono infine le proprietà reologiche dei polimeri termoplastici; la viscosità di un polimero termoplastico è una caratteristica legata al suo peso molecolare.

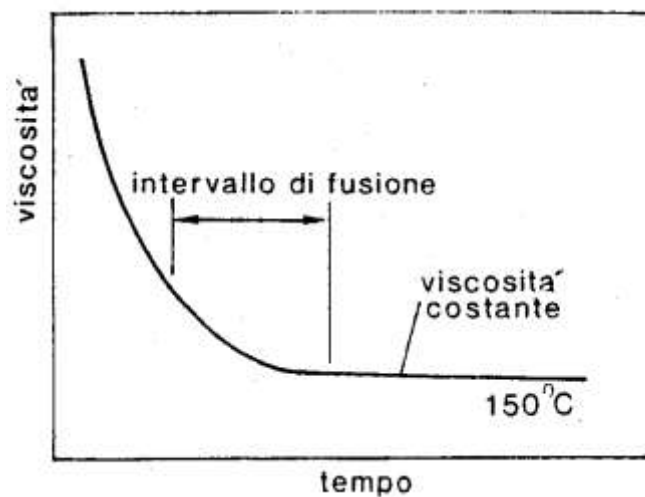



***Fig.1.4*** *Diagramma viscosità-tempo a temperatura costante di un polimero termoplastico*

La viscosità diminuisce all'aumentare della temperatura ma anche all'aumentare della velocità di scorrimento e dello sforzo di taglio.

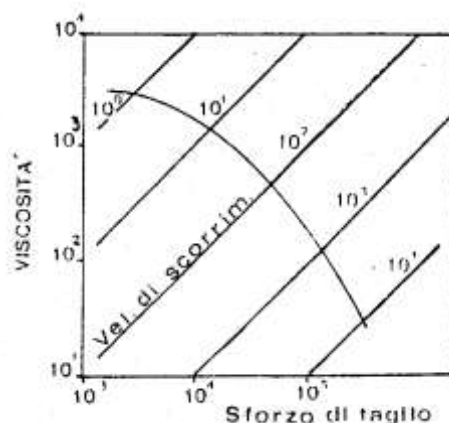



***Fig. 1.5*** *Diagramma viscosità-sforzo di taglio-velocità di scorrimento di un polimero termoplastico.*

I compositi a matrice termoplastica presentano alcuni vantaggi: il materiale grezzo è più economico ed ha una durata utile maggiore, i processi di fabbricazione possono essere estremamente rapidi, anche inferiori al minuto, tali materiali risultano eco-compatibili, poiché possono essere riciclati e recuperati, possono essere impiegate tecniche convenzionali di saldatura, (per alta frequenza o frizione), sono molto resilienti quindi capaci di assorbire gli urti, ma anche le vibrazioni ed i rumori.

***Tab. 1.1*** *Polimeri termoplastici: proprietà a confronto*

| Materiale | Temperatura inflessione (1.82MPa) [°C] | Resistenza a trazione [MPa] | Modulo elastico trazione [GPa] | Resistenza impatto [J/m] | Densità [g/cm$^3$] | Costante dielettrica @60Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **ABS** | 99 | 41 | 2.3 | 347 | 1.18 | 3.0 |
| **LDPE** | 43 | 11.6 | 0.17 | NB | 0.92 | 2.3 |
| **HDPE** | 74 | 38.2 | --- | 373 | 0.95 | 2.3 |
| **PP** | 102 | 35.8 | 1.6 | 43 | 0.90 | 2.2 |
| **PS** | 93 | 45.1 | 3.1 | 59 | 1.05 | 2.5 |
| **PVC-rigido** | 68 | 44.4 | 2.75 | 181 | 1.4 | 3.4 |
| **PVC-flessibile** | --- | 9.6 | --- | 293 | 1.4 | 5.5 |
| **PMMA** | 92 | 72.4 | 3 | 21 | 1.19 | 3.7 |
| **LCP** | 311 | 110 | 11 | 101 | 1.70 | 4.6 |
| **Nylon6** | 65 | 81.4 | 2.76 | 59 | 1.13 | 3.8 |
| **Nylon6/6** | 90 | 82.7 | 2.83 | 53 | 1.14 | 4.0 |
| **PBT** | 54 | 52 | 2.3 | 53 | 1.31 | 3.3 |
| **PC** | 129 | 69 | 2.3 | 694 | 1.20 | 3.2 |
| **PEEK** | 160 | 93.8 | 3.5 | 59 | 1.32 | --- |
| **PEI** | 210 | 105 | 3 | 53 | 1.27 | 3.2 |
| **PES** | 203 | 84.1 | 2.6 | 75 | 1.37 | 3.5 |
| **PET** | 224 | 159 | 9.96 | 101 | 1.56 | 3.6 |
| **PPS** | 260 | 138 | 11.7 | 69 | 1.67 | 3.1 |
| **PSU** | 174 | 73.8 | 2.5 | 64 | 1.24 | 3.5 |

***Tab. 1.2*** *Polimeri termoplastici: prezzi, espressi in $, a confronto per produzioni oltre i 9 milioni di kg (Fonte: Plastic News, 2006)*

| | Polimero vergine | Polimero riciclato |
|---|---|---|
| **HPDE** | 83-85 | 55-58 |
| **LDPE** | 37-39 | 31-36 |
| **PP** | 81-84 | 40-44 |
| **ABS** | 92-94 | 50-60 |
| **PVC** | 63-67 | 28-34 |
| **Nylon 6** | 165-175 | --- |
| **Nylon 66** | 172-180 | --- |
| **ABS** | 92-94 | 50-60 |
| **ABS, extra impact** | 106-116 | --- |

### 1.2.2 TERMOINDURENTI

I materiali polimerici termoindurenti [1,2,4] hanno una struttura molecolare reticolata formata da legami covalenti. Alcune resine termoindurenti sono reticolate per mezzo del calore o attraverso calore e pressione combinati. In altri casi la reazione chimica puà avvenire a temperatura ambiente (termoindurenti a freddo).

Benchè i manufatti in resina termoindurente [5,6] possano ammorbidirsi per effetto del calore ($T_g$), i legami covalenti del reticolo impediscono loro di ritornare allo stato fluido che esisteva prima della reticolazione, anzi se il riscaldamento comporta il superamento della temperatura di degrado, questi si decompongono carbonizzandosi. I materiali termoindurenti, perciò, non possono venire nuovamente riscaldati e quindi fusi come succede con i termoplastici. Questo per i termoindurenti è uno svantaggio, perché gli scarti prodotti durante la lavorazione non possono essere riciclati e riutilizzati. In generale i vantaggi delle materie plastiche termoindurenti per applicazioni di progetto tecnologico sono uno o più fra i seguenti:

- elevata stabilità termica;
- elevata rigidità;
- elevata stabilità dimensionale;
- resistenza al creep e alla deformazione sotto carico;
- basso peso;
- elevate proprietà di isolamento elettrico e termico.

Le proprietà della resina polimerizzata dipendono da una serie di fattori: la scelta del ciclo di curing, l'azione degli agenti induritori, la presenza di diluenti o additivi.

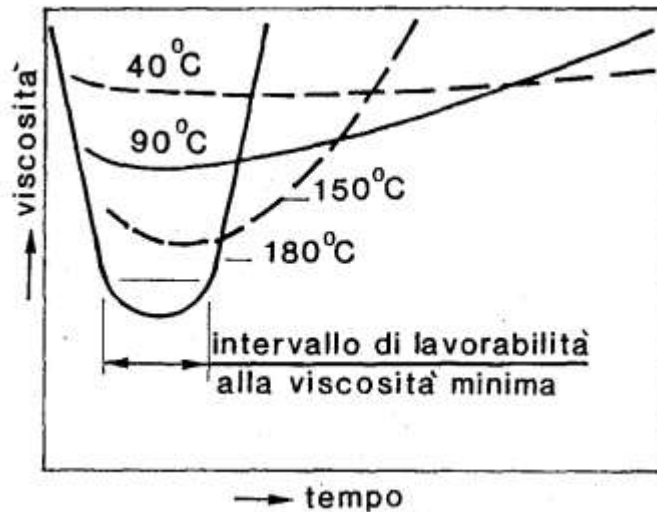



***Fig. 1.6*** *Diagramma viscosità-tempo a diverse temperature di una resina termoindurente*

Una classificazione di tali resine [17, 18, 19] può essere fatta in base al campo di temperature nelle quali le matrici dovranno lavorare.

Per temperature minori di 250° C sono utilizzate le epossidiche che sono le più importanti dato che risultano avere proprietà meccaniche migliori di altri polimeri, ottima adesione alle fibre, buona resistenza chimica, basso ritiro e quindi bassi valori di sollecitazione residue, associate ad una notevole stabilità termica.

Per temperature intermedie, cioè tra 150°C e 250°C, si trovano le resine epossidiche come la Novolac, le epossidiche standard e le ciclo linfatiche. Seguono le poliesteri termoindurenti (da non confondere con le poliesteri termoplastiche) che nel corso del XX secolo hanno trovato un'ottima applicazione in combinazione con le fibre di vetro (vetroresina). Il loro successo trova spiegazione nel basso costo, nel breve tempo di polimerizzazione e in buone caratteristiche meccaniche.

Per temperature oltre i 250°C si utilizzano polimeri poliammidici, fenolici e siliconici anche se queste due ultime resine non hanno eccezionali caratteristiche meccaniche.

Come già accennato i polimeri termoindurenti [8,9,10,11] sono reticolati mediante un processo chiamato curing, attraverso cui la resina allo stato

fluido subisce una serie di trasformazioni passando per uno strato gelificato o gommoso fino a passare allo stato vetroso. La figura 1.7 mostra il diagramma di stato generalizzato TTT (Tempo-Temperatura-Trasformazione) ottenuto da esperimenti isotermici di un tipico processo che non coinvolge separazioni di fase. Si vedano i quattro distinti stati del materiale (liquido, elastomero,vetro non gelificato e gelificato) che si incontrano durante il "curing" (reticolazione). Si possono riscontrare le temperature critiche. Esse sono: $T_{g\infty}$, ossia la temperatura massima di trasformazione vetrosa per sistemi completamente vulcanizzati; gel-$T_g$, ossia la temperatura isometrica alla quale la gelificazione e la vetrificazione avvengono simultaneamente; la $T_{gr}$, la temperatura di transizione vetrosa dei reagenti. Se un materiale è vulcanizzato isotermicamente sopra la $T_{g\infty}$, il liquido gelifica per formare un elastomero ma non gelifica in assenza di degradazione. Una cottura isotermica ad una temperatura intermadia tra la $T_g$ e la $T_{g\infty}$ causa, invece, prima la gelificazione e poi la vetrificazione. Se le reazioni chimiche sono smorzate dalla vetrificazione ne segue che la resina non sarà completamente polimerizzata. Alla temperatura di gel-$T_g$ si ha vetrificazione appena il materiale gelifica. A temperature al di sotto della gel-$T_g$ ma sopra la $T_{gr}$ il liquido viscoso può vetrificare semplicemente tramite un aumento del peso molecolare e se le reazioni chimiche sono congelate dalla vetrificazione il materiale non gelifica. Se la temperatura di immagazzinamento è sotto la gel $T_g$, il fluido si converte in un solido vetrificato di basso peso molecolare stabile ma che può essere ancora liquefatto tramite calore e quindi vulcanizzato. Sopra la gel $T_g$ il materiale avrà invece una vita finita, per i susseguenti processi.

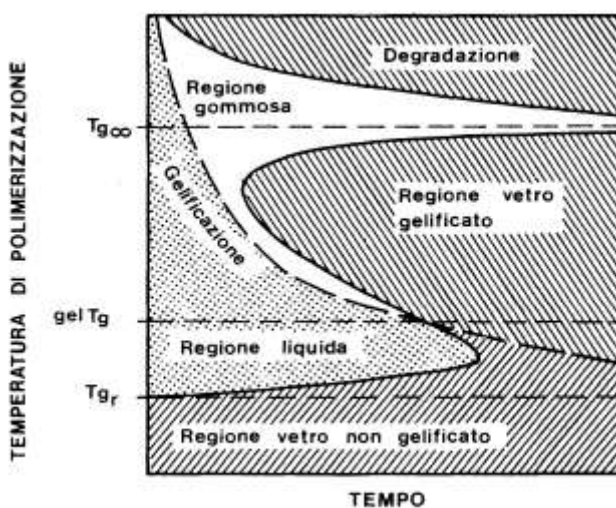



***Fig. 1.7*** *Diagramma Tempo-Temperatura-Trasformazione*

In generale, se la $T_{curing}<T_{g\infty}$ il materiale vetrifica e non è possibile una conversione chimica completa. Di solito il materiale viene post-cured sopra la $T_{g\infty}$ per sviluppare l'optimum delle proprietà. Per alcuni materiali polimerici la $T_{g\infty}$ può essere sopra i limiti di stabilità termica, nel quale caso non è ottenibile la completa conversione chimica.

***Tab. 1.3*** *Caratteristiche di alcuni polimeri a temperatura ambiente*

| Proprietà | Poliestere | Epossidica | Fenolica | Siliconica | Termoplastica (Peek 45 G) |
|---|---|---|---|---|---|
| Densità ($kg/m^3$) | 1100 ÷ 1460 | 1110 ÷ 1400 | 1300 ÷ 1320 | 1700 ÷ 1900 | 1300 |
| Modulo a trazione E (GPa) | 2 ÷ 4,5 | 2,3 ÷ 3,9 | 3,1 | – | 3,8 |
| Resist. a trazione (MPa) | 42 ÷ 68 | 28 ÷ 91 | 41 ÷ 62 | 20 ÷ 48 | 100 |
| Resist. a compressione (MPa) | 90 ÷ 186 | 100 ÷ 175 | 86 ÷ 103 | 62 ÷ 124 | – |
| Resist. a flessione (MPa) | 58 ÷ 117 | 106 ÷ 129 | 75 ÷ 117 | 67 | – |
| Calore specifico ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) | | | | | |
| Conducib. termica ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) | 0,21 | 0,21 | – | – | – |
| Coefficiente di dilatazione termica ($10^{-6}\ °C^{-1}$) | 80 ÷ 100 | 50 ÷ 70 | 60 ÷ 80 | 300 | – |
| Temperatura di transizione vetrosa (°C) | 100 | 120 | – | – | 143 |
| Coefficiente di Poisson | 0,34 | 0,20 ÷ 0,34 | – | – | – |
| Resilienza J (prove Izod) | 0,27 ÷ 0,54 | 0,2 ÷ 2,3 | 0,3 ÷ 0,5 | 5,5 | – |
| Durezza (Rockwell M) | 115 | 100 ÷ 112 | 120 | 45 | – |
| Assorbimento $H_2O$ (%) | 0,15 ÷ 0,60 | 0,08 ÷ 0,15 | 0,3 ÷ 1,0 | 0,2 ÷ 0,5 | – |

***Tab. 1.4*** *Compositi a matrice termoindurente: proprietà e applicazioni*

| Matrice | Proprietà | Temp. utilizzo [°C] | Costo | Settore appplicativo | Processi trasfromazione | Alcuni produttori |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Poliestere** | Reticolazione a temperature ambiente, basse proprietà meccaniche, buona resistenza chimica (specialmente agli acidi) | 60-150 | Basso | Condutture, piccole imbarcazioni, automotive, industria civile | Hand lay-up, RTM, VARTM, filament winding, pultrusione, spray lay-up, compression molding | Dow, Ashland, Reichhold, Scott Bader, Cray Valley, DSM, Matrasur, Mapei |
| **Vinilestere** | Migliori proprietà meccaniche delle poliesteri, temperature di reticolazione da ambiente a medie, buona resistenza chimica (specialmente agli acidi) | 60-150 | Basso | Condutture, navale, automotive, industria civile | Hand lay-up, RTM, VARTM, filament winding, pultrusione, spray lay-up, compression molding | Dow, Ashland, Reichhold, Scott Bader, Cray Valley. |
| **Fenolica** | Necessità pressione in fase di reticolazione per evitare formazione di bolle, proprietà meccaniche medie, eccellente resistenza al fuoco | 70-170 | Basso | Interni, laminati | Compression molding, RTM, filament winding | Dow, J D Lincoln, Gurit, Seal. |
| **Epossidica** | Eccellenti proprietà meccaniche, necessità di un indurente per la reticolazione, stabilità dimensionale, temperatura di reticolazione da ambiente ad alta, buona resistenza chimica (specialmente agli alcali), adesione ai metalli molto buona | 80-215 | Medio-Alto | condutture, profilati, automotive, navale, aerospaziale | Hand lay-up, pultrusione, filament winding, RTM, VARTM, autoclave, compression molding | Gurit, Dow, Huntsman, Reichhold, Hexion, Cray Valley, Cytec, Hexcel, ACG, Toray, Seal, Sika, Mapei |
| **Benzoxazine** | Proprietà meccaniche eccellenti, temperature di reticolazione da medie a alte, eccellente resistenza al fuoco | 80-250 | Medio-Alto | Interiorni, componenti aerospaziali | autoclave, RTM | Henkel, Huntsman |
| **Ftalonitrile** | Buone proprietà meccaniche, temperature di reticolazione da medie ad alte, eccellente stabilità termica | 80-250 | Alto | Componenti aerospaziali, missili | autoclave, reticolazione in pressa riscaldata, RTM | Maverick, Renegade Materials, JFC Technologies. |
| **Poliuretanica** | Buone proprietà meccaniche, temperature di reticolazione da medie ad alte, può essere reticolata con cicli veloci | 80-200 | Medio-Basso | arredamenti, automotive, navale | RTM, SRIM | Bayer, BASF, Dow, Aptek, BCC Products |
| **Estere-cianato** | Buone proprietà meccaniche, alte temperature di reticolazione, la formulazione per la reticolazione deve essere studuata e controllata attentamente per evitare reazioni indesiderate esotermiche, eccellenti proprietà termiche, trasparente alle onde elettromagnetiche | 150-250 | Alto | Componenti aerospazioni, componenti elettronici | Autoclave, RTM | Lonza |
| **Bismaleimide** | Buone proprietà meccaniche, elevate temperature di reticolazione, eccellenti proprietà termiche | 230-320 | Alto | Componenti aerospaziali | Autoclave | Huntsman, Cytec |
| **Poliimmide** | Buone proprietà meccaniche, Alte temperature di reticolazione, eccellenti proprietà termiche | 200-350 | Alto | Componenti aerospazioni, componenti elettronici | VARTM, RTM, compression molding, autoclave | Cytec, Hexcel |

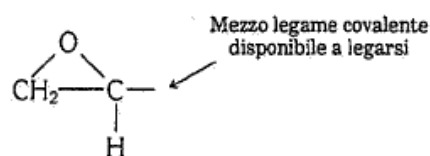
### 1.2.2.1 LE RESINE EPOSSIDICHE

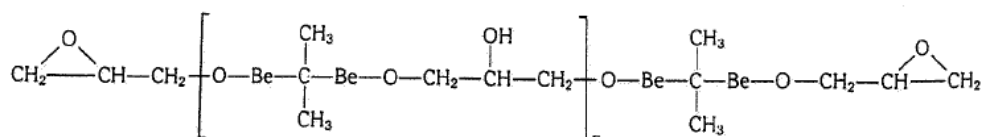
Le resine epossidiche [2,5] rappresentano una famiglia di materiali polimerici termoindurenti che non danno luogo a formazione di prodotti di reazione quando induriscono (reticolano) e perciò hanno un basso ritiro di reticolazione. Essi presentano anche buona adesione ad altri materiali, buona resistenza chimica e ambientale, ottime proprietà meccaniche e buone proprietà di isolamento elettrico. Sono largamente usate in rivestimenti protettivi, anche di automobili, o altre applicazioni, quali materiali elettronici, compositi strutturali, pavimentazioni e adesivi [12]. Le resine epossidiche sono anche utilizzate per la preparazione di laminati e come matrice nei compositi rinforzati con fibre. Queste resine sono il materiale predominante delle matrici di molti compositi ad alte prestazioni come quelli rinforzati con fibre ad alto modulo (ad esempio le fibre di carbonio).

Il basso peso molecolare delle resine epossidiche [17, 18, 19] non indurite e allo stato liquido dà loro una mobilità molecolare eccezionalmente elevata durante la trasformazione. Questa proprietà permette alla resina epossidca liquida di bagnare le superfici velocemente e completamente. Le proprietà di bagnabilità sono importanti quando le resine epossidiche vengono utilizzate in materiali rinforzati e come adesivi. L'elevata reattività del gruppo epossidico con agenti di reticolazione come le ammine fornisce un alto grado di reticolazione e quindi elevata durezza, resistenza meccanica e chimica. Dato che non si formano sottoprodotti durante la reazione di reticolazione, ci sono bassi ritiri durante l'indurimento.

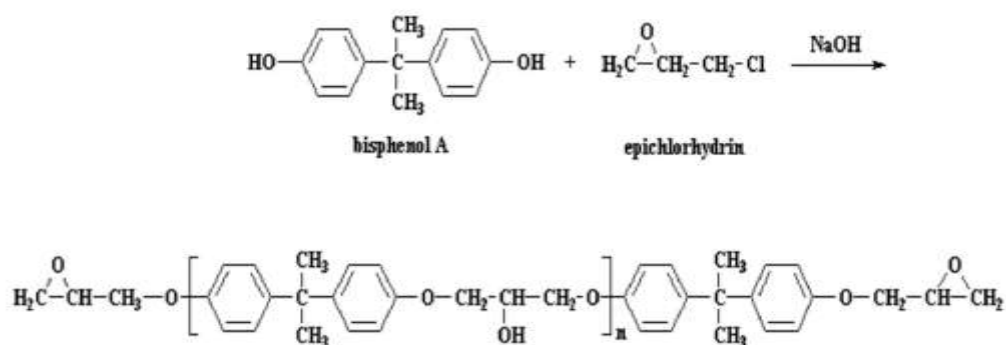
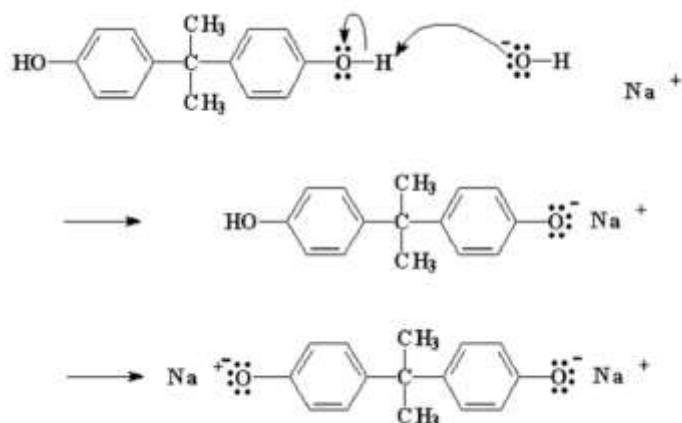
Le resine epossidiche sono caratterizzate da una molecola contenente due o più gruppi epossidici, la cui formula chimica è la seguente:

$$\overset{\overbrace{\phantom{CH_2-C}}^{O}}{CH_2-\underset{H}{\underset{|}{C}}}-$$

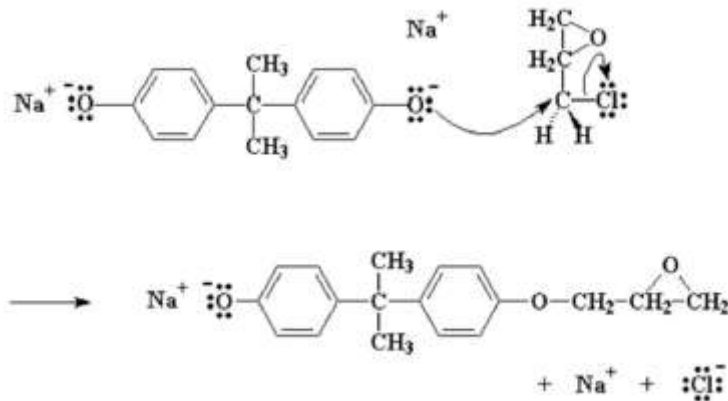
Mezzo legame covalente disponibile a legarsi

La maggior parte delle resine epossidiche commerciali hanno la formula generale di struttura (dove *Be* è l'anello benzenico):

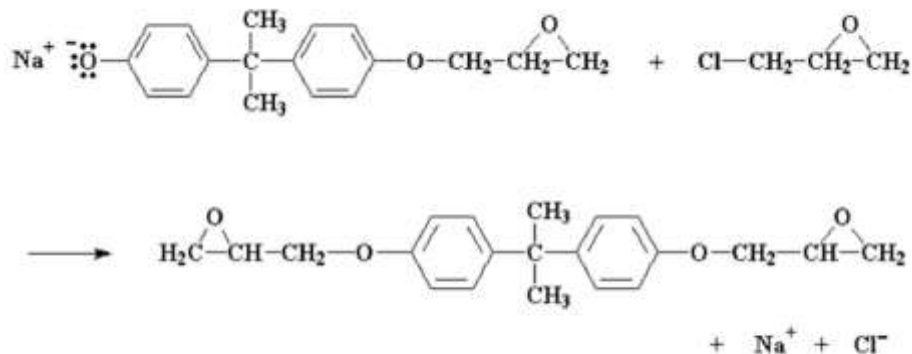
$$\overset{\overbrace{\phantom{CH_2-CH}}^{O}}{CH_2-CH}-CH_2-\left[O-Be-\underset{CH_3}{\overset{CH_3}{C}}-Be-O-CH_2-\overset{OH}{CH}-CH_2\right]_n-O-Be-\underset{CH_3}{\overset{CH_3}{C}}-Be-O-CH_2-\overset{\overbrace{\phantom{CH-CH_2}}^{O}}{CH-CH_2}$$

Per i prodotti liquidi *n* nella formula è generalmente meno di 1. Per le resine solide *n* è pari o maggiore a 2. Ci sono anche molti altri tipi di resine epossidiche con strutture diverse da quella appena illustrata.

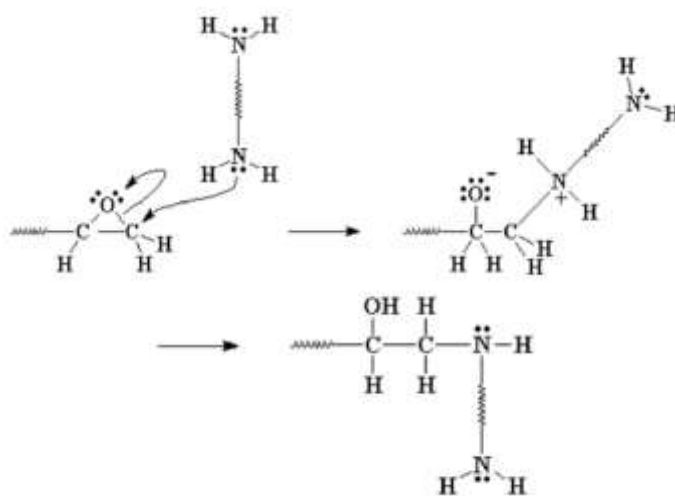
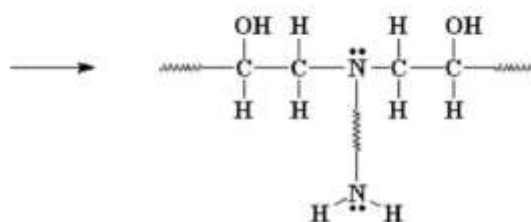
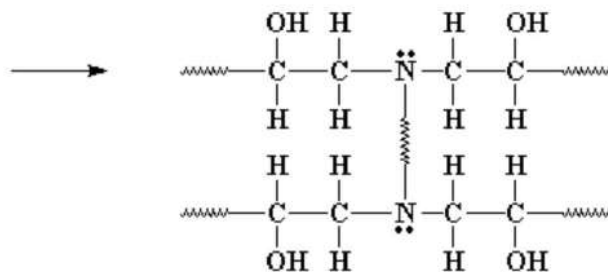
Prima della reticolazione, le resine epossidiche, si presentano sotto forma di una miscela di reazione costituita da una miscela di oligomeri, a peso molecolare non elevato e con scarse proprietà meccaniche e termiche, e da un agente induritore. La miscela reattiva forma una struttura reticolata quando viene sottoposta ad un opportuno trattamento termico (curing) in un appropriato intervallo di temperatura.

Una resina epossidica viene ottenuta mediante un processo di polimerizzazione a stadi. Il pre-polimero viene preparato usando il bisfenolo A e l'epicloridrina.

In primo luogo, l'idrossido di sodio NaOH reagisce con il bisfenolo A, per dare il sale di sodio del bisfenolo A.

Il sale ha un atomo di ossigeno con tre coppie di elettroni che non condivide con nessuno. Trova quindi un atomo di carbonio, su una epicloridrina vicina, che può utilizzare alcuni elettroni. Questo atomo è l'atomo di carbonio proprio vicino al cloro. Si suppone che il cloro abbia in

comune una coppia di elettroni con quell'atomo di carbonio, ma essendo elettronegativo, tende ad accaparrarsi quella coppia.

L'ossigeno cede un paio dei suoi elettroni all'atomo di carbonio. Il carbonio, naturalmente, può spartire solo quattro coppie di elettroni alla volta, quindi una coppia se ne deve andare se vuole prendere la coppia dell'ossigeno. Lascia quindi andare gli elettroni che ha condiviso con il cloro ed espelle dalla molecola l'atomo di cloro.

In questo modo si ottiene una molecola simile al bisfenolo A, con un gruppo epossidico in più, e un sale di scarto NaCl.

Il grado di polimerizzazione DP dipende dal rapporto tra epicloridrina e bisfenolo A; si può arrivare fino a DP=25. Aumentando il grado di polimerizzazione aumenta però anche la viscosità; ciò causa delle difficoltà nella lavorazione della resina quindi si preferisca tenere il grado di polimerizzazioni a valori molto bassi in modo da avere una miscela di dimeri. Utilizzando infatti due molecole di epicloridrina per ogni molecola di bisfenolo A Si ottiene un gruppo epossidico anche sull'altro lato. La reazione a questo punto si ferma, in quanto non ci sono più gruppi salini di bisfenolo A in grado di reagire.

Per ottenere un materiale solido termoindurente, le resine epossidiche devono indurire con l'aiuto di agenti di reticolazione e/o catalizzatori. I gruppi epossidici e idrossilici sono funzioni reattive di reticolazione. Gli agenti di reticolazione includono le ammine, anidridi e prodotti di condensazione delle aldeidi. Ammine come la dietile-triammina e la trietile-tetra-ammina vengono utilizzate come agenti di reticolazione per l'indurimento a temperatura ambiente quando i requisiti termici per le sostanze epossidiche solide sono bassi (al di sotto di circa 100°C). Alcune resine epossidiche vengono reticolate con l'aiuto di agenti indurenti, mentre altre possono reagire con le loro stesse funzioni reattive in presenza di un approprioato catalizzatore. In una reazione epossidica, l'anello epossidico si apre e l'atomo di ossigeno proveniente dal gruppo epossidco si lega con un atomo di idrogeno proveniente da un donatore come, ad esempio, una ammina o un gruppo idrossilico.

Nel primo step di reticolazione la diammina reagisce con i gruppi epossidici alle estremità dei prepolimeri.

Ogni gruppo amminico ha due atomi di idrogeno e può quindi legarsi a due gruppi epossidici:

Anche il gruppo amminico sull'altra parte terminale della diammina può reagire anche con due gruppi epossidici. Alla fine si ottengono quattro prepolimeri epossidici legati ad una molecola di diammina:

Vista la presenza dell'altro gruppo epossidico nel prepolimero si ottiene infine un reticolo tridimensionale simile al seguente. Una caratteristica importante di questa reazione è quella che non si forma alcun sottoprodotto.

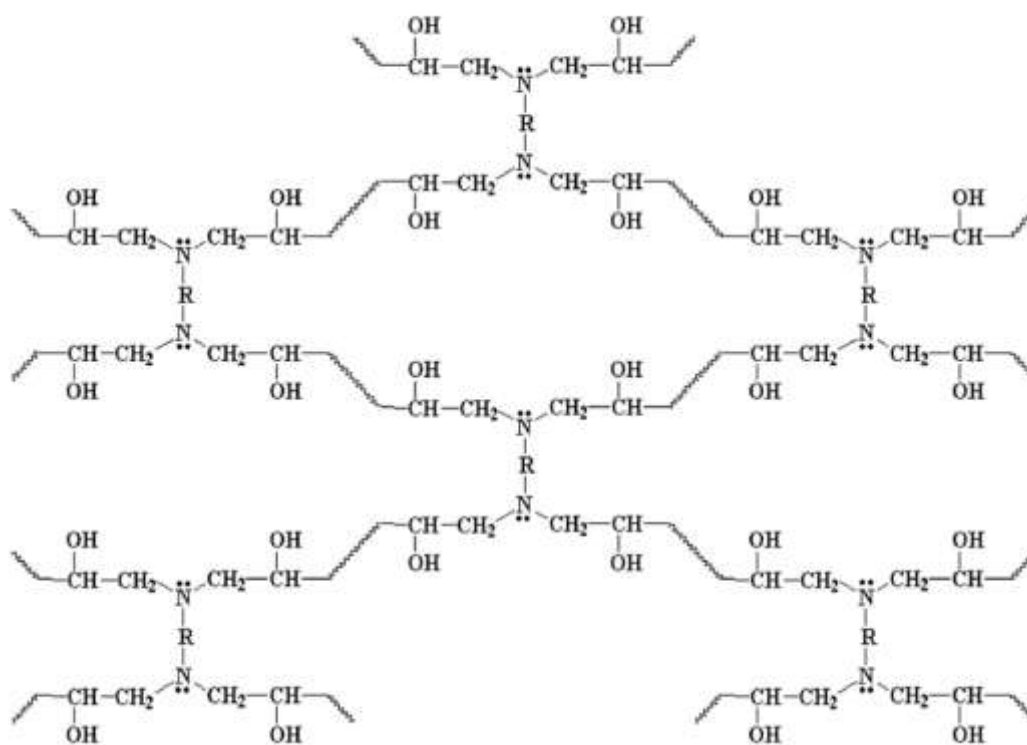



***Fig. 1.7*** *Schematizzazione della struttura chimica di una resina epossidica reticolata*

*Tab. 1.5* *Strutture di alcuni monomeri commerciali*

| Nome chimico | Struttura chimica | Esempi commerciali |
|---|---|---|
| Diglicidiletere del bisfenolo A | | EPON$^{TM}$ 828, EPON 1000 |
| Diglicidiletere del bisfenolo F | | PY306 |
| Triglicidil p-amminofenolo | | MY0510 |
| Tetraglicidil-4,4' diammino-difenilmetano | | MY721 |

***Tab. 1.6*** *Costo delle comuni resine epossidiche*

| Resina | $/kg |
|---|---|
| Liquida (Diglicidiletere del bisfenolo A) | 2.2 |
| Solida | 2.4 |
| Diglicidiletere del bisfenolo F | 4.4 |
| Multifunctionale | |
| Fenolica-novolacca | 4.8 |
| Cresolo-novolacca | 8.8 |
| Altre multifunzionali | 11-44 |
| Cicloalifatica | 6.6 |
| Bromurata | 3.3-5.5 |
| Epossi-vinilestere | 3.3 |

Di seguito si riporta una tabella che mette in luce il confronto tra le resine epossidiche e le resine poliestere insature che rappresentano la classe di resine termoindurenti in assoluto più utilizzata.

***Tab. 1.7*** *Confronto tra le proprietà delle resine epossidiche e le resine poliestere insature*

| | **Epossidiche** | **Poliestere insature** |
|---|---|---|
| **Sito attivo** | Anello epossidico | Legame C=C |
| **Conservazione** | Generalmente stabile per lunghi periodi lameno che non sia stato premiscelato l'indurente | Meno stabile delle epossidiche sia prima che dopo la miscelazione col catalizzatore (MEKP) |
| **Uso di inibitore** | Raro | Frequente |
| **Uso di solventi/diluenti** | La maggior parte dei sistemi non hanno solventi; i diluenti possono essere reattivi | Stirene |
| **Prodotti volatile dal sistema** | Basso | Alto |
| **Temperatura di reticolazione** | Da temperature ambiente ad elavata | Sopratutto a temperature ambiente |
| **Ritiro di reticolazione** | Basso | Alto |
| **Adesione** | Eccellente | Buona |
| **Resistenza all'acqua** | Alta | Media |
| **Resistenza alla corrosione** | Alta | Medio-bassa |
| **Tenacità** | Medio-alto | Basso |
| **Rigidezza** | Medio-alto | Basso |
| **Resistenza al calore** | da basso a alto | Medio-basso |
| **Resistenza a fatica** | Alto | Basso |
| **Costo** | da basso a alto | Basso |

## 1.2.3 I POLIMERI ECO-COMPATIBILI

Le crescenti preoccupazioni per quanto riguarda l'impatto ambientale generato dall'impiego dei materiali, in particolar modo quelle plastiche, in ogni settore della vita comune, ha portato ad assumere maggiore interesse verso quei prodotti basati su materiali a basso impatto ambientale e per quanto riguarda le plastiche alle matrici polimeriche ecocompatibili. Una

classificazione di potenziali polimeri biodegradabili è mostrato nella seguente figura.

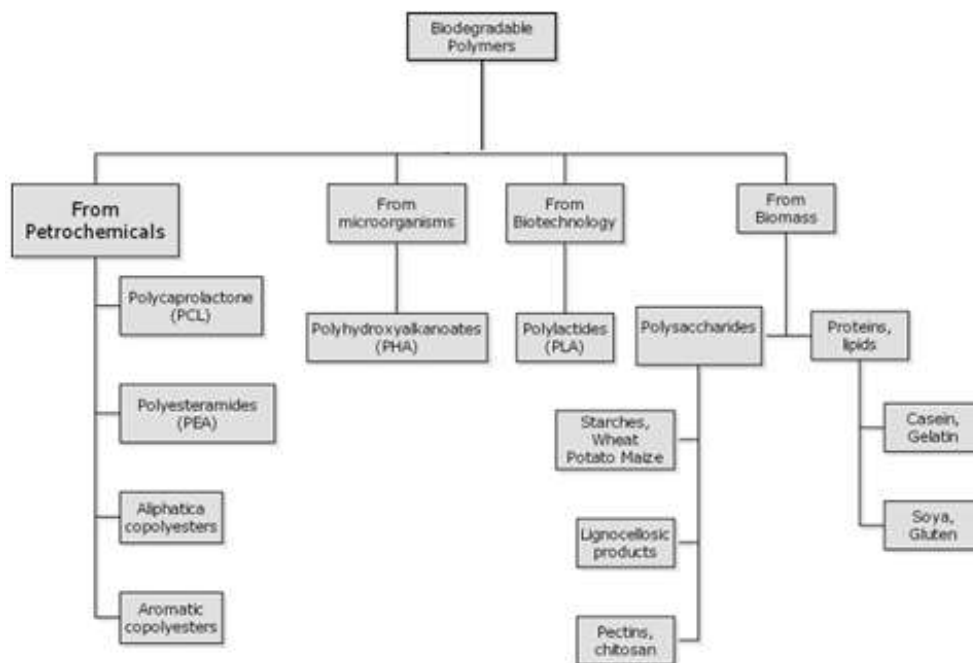



***Fig. 1.8*** *Matrici polimeriche biodegradabili*

La precedente figura mostra che esistono molte alternative [20,21,22]. Alcune matrici biodegradabili sono ottenute da prodotti petrolchimici standard, quindi, offrono i vantaggi di biodegradabilità, ma si basano su materie prime non rinnovabili. Le matrici ottenute da biomasse e microrganismi possono superare questo limite ed offrire una vera alternativa rinnovabile ai tradizionali prodotti di sintesi [23, 24, 25].

Nel campo della matrici "verdi" [26, 27, 28] termoplastiche esistono degli esempi interessanti: le poli (a-idrossi-acidi), le poli (acido glicolico) (PGA) o poli (acido lattico) (PLA). Si tratta di polimeri cristallini con punti di fusione relativamente alti. Recentemente, il PLA è stata attenzionato per la sua disponibilità da fonti rinnovabili come il mais. Il Poli (b-idrossi-alcanoato) (PHA) che viene sintetizzato biochimicamente da fermentazione microbica rappresenta un poliestere naturale. Il Poli (b-idrossi-butirrato) (PHB) (nome commerciale Biopol) è un poliestere biotecnologicamente prodotto che costituisce una riserva di carbonio in una vasta gamma di batteri e ha attirato molta attenzione come poliestere termoplastico biodegradabile perché presenta proprietà che competono con poliesteri tradizionali. Altri esempi interessanti sono le matrici derivato da amido e da cellulosa. L'amido è uno dei meno costosi materiali biodegradabili presenti nel

mercato mondiale di oggi. Si tratta di un polimero versatile, con un potenziale immenso per l'utilizzo in settori non alimentari. La cellulosa derivante da alberi e piante di cotone può essere un sostituto del petrolio per la produzione di plastica cellulosiche. Un elenco di poliesteri biodegradabili disponibili in commercio è indicato nella Tabella 1.8. Le proprietà fisiche e meccaniche di alcune plastiche biodegradabili sono riassunti nella tabella 1.9.

***Tab. 1.8*** *Resine poliestere biodegradabili disponibili in commercio*

| | Nome commerciale | Produttore |
|---|---|---|
| Agro-polyester | | |
| PLA | Natureworks | Cargill-Dow |
| | Lacty | Shimadzu |
| | Lacea | Mitsui Chemicals |
| | Heplon | Chronopol |
| | CPLA | Dainippon Ink Chem. |
| | PLA | Galactic |
| PHA | | |
| PHB, PHBV | Biopol | Monsanto-Metabolix |
| PHB, PHBV | Biocycle | Copersucar |
| PHBHx, PHBO, PHBOd | Nodax | Procter & Gamble |
| Petroleum based polyestes | | |
| PCL | CAPA | Solvay |
| | Tone | Union Carbide |
| | Celgreen | Daicel |
| PEA | BAK | Bayer |
| Alihaptic polyesters | Bionelles | Showa Highpolymer |
| | Enpol | Ire Chemical ltd |
| | Skygreen | SK Chemicals |
| | Lunare SE | Nippon Shokubai |
| Aromatic copolyesters | Eastar Bio | Eastman Chemical |
| | Ecoflex | BASF |
| | Biomax | Dupont |
| | PHEE | Dow Chemical |

***Tab. 1.9*** *Proprietà fisiche e meccaniche di alcune resine posliestere biodegradabili*

| | PLA Ingeo™ 3001D | PBHV Biopol D400G | PCL CAPA® 680 | PEA BAK 1095 | PBSA Bionelle™ 3000 | PBAT Eastar™ Bio 1466 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Densità [g/cm$^3$] | 1.24 | 1.25 | 1.11 | 1.07 | 1.23 | 1.21 |
| Temperatura fusione [°C] | 152 | 153 | 65 | 112 | 114 | 110-115 |
| $T_g$ [°C] | 58 | 5 | -61 | -29 | -45 | -30 |
| Cristallinità [%] | 0-100 | 51 | 67 | 33 | 41 | 20-35 |
| Modulo el. [MPa] | - | 900 | 190 | 262 | 249 | 52 |
| Allung. a rottura [%] | 3.5 | 15 | >500 | 420 | >500 | >500 |
| Resist. trazione [MPa] | - | - | 14 | 17 | 19 | 9 |

Un altro aspetto che ha guadagnato l'attenzione globale è lo sviluppo di plastiche biodegradabili da oli vegetali come l'olio di soia, olio di arachidi, olio di noci, olio di sesamo e olio di girasole. I materiali compositi "verdi" che hanno come matrice le bioplastiche a base di proteine da soia e come rinforzo fibre naturali hanno dimostrato di possedere un grande potenziale.

Olio di ricino epossidato, olio di soia epossidato e altri oli vegetali epossidati sono attualmente impiegati in alcune applicazioni tipiche delle resine epossidiche. Molte formulazioni commerciali sono definite "verdi", ma, nella maggior parte dei casi, sono miscele di oli a base di resine epossidiche e tradizionali monomeri epossidici sintetici, quindi da fonti non rinnovabili. Entropy Resins offre resine epossidiche con il 48% in peso di monomero bio. Super Sap ™ 1000 è un sistema epossidico, costituito da due parti liquide, progettato per la classica laminazione e per temperature di reticolazione ambiente. Super Sap 1000 è prodotto a partire da bio-materiali rinnovabili di provenienza dai flussi di rifiuti di altri processi industriali come la lavorazione del legno e la produzione dei bio-carburanti. Altre fonti commerciali di formulazioni epossidiche "verdi" sono Ecopoxy e Bioresins. Quando il contenuto vegetale viene aumentato, quello che si osserva è una diminuzione della resistenza a trazione e del modulo, ma, d'altra parte, la formulazione è più flessibile e resistente agli urti (Tabella 1.10).

***Tab. 1.10*** *Proprietà meccaniche delle resine epossidiche da olii vegetali*

| Olio (wt%) | Resistenza trazione (MPa) | Modulo elastico (MPa) | Allungam. A rottura (%) | Resistenza flessione (MPa) | Modulo flessione (MPa) | Energia impatto (kJ/m$^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| --- | 55.7 | 2549.0 | 4.5 | 81.5 | 2207.0 | 9.4 |
| 7.68 | 45.1 | 1935.9 | 5.6 | 60.6 | 1769.0 | 13.9 |
| 22.95 | 37.7 | 1370.9 | 5.9 | 55.6 | 1487.2 | 15.3 |
| 37.02 | 23.4 | 1113.8 | 14.2 | 28.9 | 875.1 | 15.6 |
| 54.19 | 4.9 | 198.7 | 49.1 | 4.7 | 154.1 | 21.5 |

Tra le diverse fonti rinnovabili, l'olio di semi di anacardi che è un sottoprodotto agricolo abbondantemente disponibile nei paesi tropicali, è una delle principali risorse di fenoli presenti in natura. La natura fenolica del risultante cardanolo permette di reagire con la formaldeide sotto una varietà di condizioni per dare origine alle resine Novolac e Resole. Rispetto alle convenzionali resine fenoliche, le resine cardanolo-formaldeide hanno una maggiore flessibilità (per effetto della plasticizzazione interna delle

catene lunghe), portando ad una migliore processabilità. La catena laterale conferisce una natura idrofobica al polimero, quindi lo rende idrorepellente e resistente agli agenti atmosferici. Una fonte commerciale di formulazioni a base cardanolo è Cimteclab.

Gli oli vegetali sono stati utilizzati per la produzione di polioli, uno dei due componenti di base nel settore dei poliuretani isocianati. Diversi poliuretani "verdi" sono disponibili sul mercato. Bayer ha prodotto dei sistemi poliuretanici con circa il 70% in peso di monomeri verdi. Bioresins offre una vasta gamma di sistemi poliuretanici verdi.

## 1.3 LE FIBRE DI RINFORZO

Alle fibre è affidato, nella maggior parte dei casi, il compito di fornire al composito la proprietà desiderate di resistenza e rigidezza.

Dal punto di vista dell'origine è possibile distinguere due categorie di fibre: le fibre naturali e quelle sintetiche.

Fino a non molti anni fa, il predominio nei materiali compositi a matrice polimerica era rappresentato da quelle sintetiche che oltre ad essere prodotte a scopi essenzialmente tessili, sono prodotte anche per scopi di tipo ingegneristico.

Le fibre di vetro sono il tipo di rinforzo più noto; è prodotto nella forma standard come vetro E. Tutti i vetri hanno un rapporto resistenza su peso molto alto sebbene le fibre di vetro siano tra le fibre inorganiche sintetiche a densità più alta. Il vetro mantiene le sue capacità meccaniche fino al 50% della sua capacità di resistenza ad una temperature di 375°C e fino al 25% a 538°C. E' possibile trafilare molti tipi di vetro di varie composizioni in filamenti continui. Il filamento è una fibra individuale ed ha lunghezza indefinita; si producono anche fibre più corte con una lunghezza di poche centinaia di millimetri.

Per lungo tempo le fibre più usate in applicazione di compositi strutturali sono state quelle di vetro. Sebbene abbiano buone caratteristiche di esistenza e bassa densità, presentano un modulo di elasticità relativamente basso. Per questo motivo, circa 25 anni fa, si iniziò a sperimentare e convertire compositi organici in fibre e tessuti di carbonio e grafite. Le elevate proprietà meccaniche delle fibre di carbonio derivano dalla particolare struttura cristallina della grafite. Quanto più si riesce ad

ottenere una valida struttura cristallina, tanto più si ottiene un materiale dalle caratteristiche notevoli.

Per la produzione sia delle fibre di carbonio che di grafite si parte da precursori e la scelta dell'uno o del'altro dipende dal costo di produzione, dalla complessità del processo, dalla rapidità di lavorazione e così via. La tecnica di base è la pirolisi di materiali organici; attualmente dopo poliacrilonitide (PAN), rayon e bitume sono le materie prime più impiegate. Le fibre vengono realizzate con un procedimento di trafilatura da una soluzione di polimero contenente un opportuno solvente. Dopo la fase di coagulazione le fibre vengono lavate, stirate ed asciugate. Lo stiramento è necessario in quanto, per causare il successivo allineamento dei cristalli, è indispensabile un pre-orientamento. Con la carbonizzazione le fibre polimeriche stabilizzate sono trasformate in fibre di carbonio: durante tale processo si verifica l'eliminazione dell'acqua, azoto e acido cianidrico con la formazione di una struttura di atomi di carbonio disposti ad anello, somigliante alla struttura della grafite. Il processo di carbonizzazione viene eseguito in atmosfera inerte e ad una temperatura tra i 1000°C e 1500°C. La grafitizzazione viene condotta sempre in atmosfera inerte ma ad una temperatura più elevata (oltre i 2000°C); si procede con il riscaldamento fino ad ottenere le proprietà richieste. Nelle varie fasi del processo viene sempre applicata una trazione sulle fibre alo scopo di ottenere caratteristiche migliori, caratteristiche che vengono essenzialmente fornite dalla diversa orientazione dei cristalli di grafite.

La fibra aramidica, costituita da catene poliammidiche sintetiche, grazie alla combinazione di ottimo peso specifico e di alta resistenza a trazione, ha la più alta resistenza specifica di tutte le altre fibre e dei materiali da costruzione omogenei. Inoltre, è superiore ad altre fibre sia dal punto di vista della resistenza all'impatto, quanto per quello che riguarda la propagazione delle cricche, nonché per lo smorzamento delle vibrazioni.

***Tab. 1.11*** *Caratteristiche di alcuni tipi di fibre sintetiche*

| Proprietà (Tipo) | Fibra di vetro E | Fibra di vetro S | Fibra di carbonio alta resis. | Fibra di carbonio alto mod. | Fibra di boro su W | Fibra di boro su C | Kevlar 29 | Kevlar 49 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Densità (kg/m³) | 2547 | 2491 | 1720 | 1860 | 2480 | 2240 | 1440 | 1450 |
| Mod. a traz. E (GPa) | 72,4 | 85,5 | 230 | 390 | 400 | 360 | 58 | 120 |
| Allungam. a rott. (%) | 4,8 | 5,7 | 1,1 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 3,7 | 1,9 |
| Massima temper. di esercizio (°C) | 550 | 650 | 316 | 316 | 316 | 316 | 204 | 204 |
| Resis. a traz. (MPa) | 2410 | 4500 | 2758 | 2344 | 2700 ÷ 3200 | | 3450 | 3450 |
| Carico di rottura (MPa) | 3448 | 4585 | 2800 | 2400 | 3300 | | 3792 | 3792 |
| Coeffic. di Poisson | 0,22 | 0,22 | 0,33 | 0,39 | 0,21 | | 0,30 | 0,30 |
| Coeff. di espan. term. lineare (x $10^{-6}$/°C) | 2,8 | 5 | -0,4(‖) 7(⊥) | -0,5(‖) 7(⊥) | 1,1 | 1,5 | -2,4 | -2,4 |
| Cal. spec. (J/(kg·K)) | 795 | 712 | 712 | 712 | – | – | – | 1419 |
| Conducibilità termica (W/(m·K)) | 1,04 | – | 24 | 105 | – | – | – | 0.04 |
| Diam. filam. (μm) | 9 | 9 | 6,5 | 7 | – | – | 12 | 12 |
| Modulo specifico (MN·m/kg) | 28,4 | 34,3 | 134 | 209,7 | 161,3 | 160,7 | 42,3 | 82,8 |
| Resistenza specifica (MN·m/kg) | 0,95 | 1,8 | 1,6 | 1,3 | 1,1 | 1,5 | 2,4 | 2,4 |

## 1.3.1 LE FIBRE NATURALI DI ORIGINE VEGETALE

Negli ultimi decenni, la crescente attenzione verso l'ambiente e le specifiche richieste legislative riguardo alla salvaguardia ambientale e il riciclo dei materiali, hanno fatto in modo che i ricercatori rivolgessero i loro studi verso lo sviluppo di materiali provenienti da fonti rinnovabili e facilmente recuperabili o degradabili a fine uso [29, 30, 31, 32, 33]. Si è cercato perciò, soprattutto in Europa, di sostituire nei compositi di più largo consumo (a base di resine epossidiche [34, 35, 36] e poliolefine [37, 38, 39]) le fibre di vetro con rinforzi meno invasivi per l'ambiente come le fibre naturali.[40, 41]

Le fibre naturali e rinnovabili vengono distinte in due tipologie principali sulla base della loro origine: vegetali ed animali [29]. Tra le fibre animali due delle più famose sono la lana e la seta, ampiamente diffuse nel settore tessile. Per l'applicazione nei materiali compositi le fibre vegetali sono le più interessanti e diffuse.

***Tab. 1.12*** *Produzione mondiale (anno 2008) di alcune fibre vegetali [42]*

| | Milion Tonnes | Main producers coutries |
|---|---|---|
| Cotton | 25 | China, USA, India, Pakistan |
| Kapok | 0.03 | Indonesia |
| Jute | 2.5 | India, Bangladesh |
| Kenaf | 0.45 | China, India, Thailand |
| Flax | 0.50 | China, France, Belgium, Belarus, Ukraine |
| Hemp | 0.10 | China |
| Ramie | 0.15 | China |
| Abaca | 0.10 | Philippines, Equador |
| Sisal | 0.30 | Brazil, China, Tanzania, Kenia |
| Henequen | 0.03 | Mexico |
| Coir | 0.45 | India, Sri Lanka |
| Wool | 2.2 | Australia, China, New Zeland |
| Silk | 0.10 | China, India |
| Manmade cellulosic fibres | 3.3 | |

Le fonti principali di fibre vegetali per applicazioni nei compositi sono di due tipi: residui agricoli di piante coltivate per altri scopi (come la bagassa della canna da zucchero e le paglie cereali) e piante coltivate espressamente per la produzione di fibre (come le piante tessili). In passato le biofibre non sono state prese in considerazione come rinforzi per materiali polimerici a causa di alcuni problemi connessi con il loro utilizzo:

- La bassa stabilità termica quindi la possibilità di degradazione della fibra e di emissione di prodotti volatili durante la lavorazione coi polimeri ad alta temperatura.
- La natura idrofila che da un lato causa instabilità dimensionale (rigonfiamento) e suscettività a macerare e dall'altro abbassa la compatibilità con le matrici polimeriche con cui sono mescolate nei compositi.
- La variabilità di proprietà e quantità a seconda della qualità del raccolto, dell'età e dell'organo della pianta da cui sono estratte, delle tecniche di estrazione, delle condizioni ambientali, della località ecc.

D'altra parte rispetto ai rinforzi tradizionali (fibre di vetro, di carbonio..) le biofibre presentano numerosi vantaggi:

- sono meno costose;

- sono facilmente reperibili ed abbondanti;
- causano meno problemi respiratori e dermatologici per gli addetti alla lavorazione;
- sono biodegradabili e biocompatibili, combustibili e riciclabili con varie matrici;
- il bilancio tra $CO_2$ catturata in fase di crescita ed emessa in fase di combustione è nullo;
- sono meno abrasive per le apparecchiature di lavorazione;
- hanno una densità minore (rispetto alle fibre di vetro e alle aramidiche) o uguali (rispetto al carbonio) delle fibre convenzionali;
- grazie alla loro natura cellulare e cava, incrementano l'isolamento acustico e termico dei compositi.

***Tab. 1.13*** *Confronto tra il costo di alcune fibre vegetali e di alcune fibre sintetiche [43]*

| **Fiber** | **Prezzo** | **Densità** | **Prezzo** |
|---|---|---|---|
| | $ /m$^3$ | Kg/m$^3$ | $ /kg |
| **Legno** | 420 | 1600 | 0,26 |
| **Lino** | 600 | 1500 | 0,40 |
| **Vetro** | 4850 | 2600 | 1,87 |
| **PP** | 650 | 900 | 0,72 |

Tuttavia se si considerano le proprietà meccaniche delle fibre convenzionali e si confrontano alle fibre vegetali si può trarre la seguente conclusione: la resistenza e il modulo a trazione delle fibre vegetali sono minori rispetto alle fibre convenzionali. La differenza tra le proprietà meccaniche viene smorzata se si prendono in considerazione le proprietà relative (rapportate alla densità).

Sebbene sono stati evidenziati molti vantaggi a favore dell'impiego delle fibre vegetali rispetto a quelle convenzionali, oggi il vantaggio principale delle fibre vegetali è legato alla bassa energia richiesta per la loro coltivazione (fig.1.9). Un parametro che descrive meglio l'impatto ambientale è il cosiddetto "embodied Energy" calcolato tenendo conto delle operazioni di coltivazione, estrazione e trasformazione delle fibre nonché dei materiali utilizzati in queste fasi. La figura 1.10, relativa al lino in mat e in tessuto con fili ritorti, mostra come non sempre le fibre vegetali richiedono un'energia inferiore. Questo è vero solo per i tessuti mat, mentre i filati ritorti in lino richiedono, per la produzione, una "quantità di energia

superiore (80GJ/ton vs 54GJ/ton) dovuta alle operazioni di finitura necessari per ottenere filati ritorti di qualità. Questo risultato è altresi importante perché spiega il maggior costo dei tessuti con filati intrecciati rispetto ai mat dove le fibre corte sono orientate casualmente e hanno lunghezze e forme differenti.

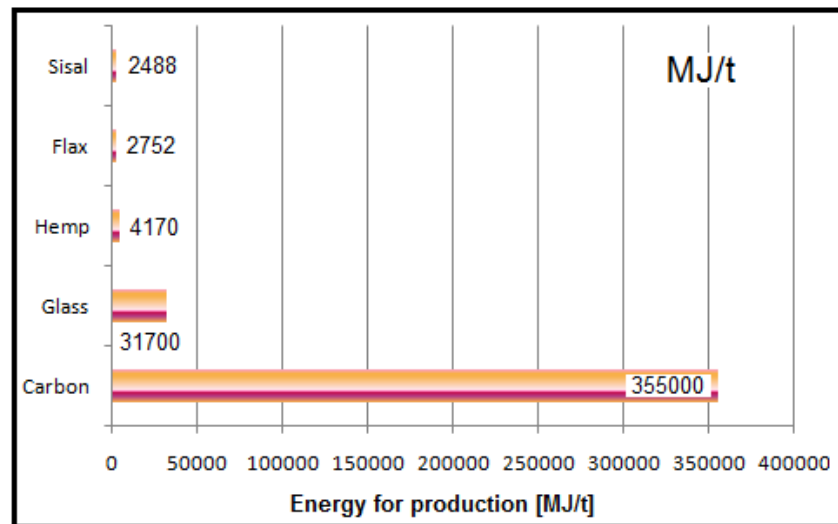



***Fig. 1.9*** *Energia richiesta per la coltivazione di alcune fibre vegetali in confronto all'energia richiesta per ottenere alcune fibre sintetiche [44]*

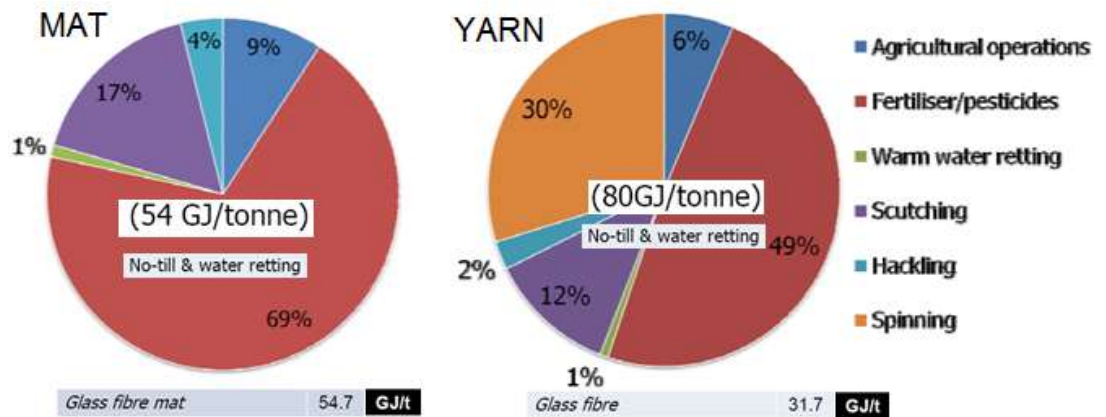



***Fig. 1.10*** *Energia richiesta per la coltivazione, estrazione e trasformazione delle fibre vegetali di lino [45]*

## 1.3.1.1 COMPOSIZIONE CHIMICA

La composizione chimica delle fibre vegetali gioca un ruolo chiave nelle caratteristiche delle fibre. Questa dipende in primo luogo dalle condizioni di

crescita, quindi dal tipo di terreno, dal clima e dalle condizioni di invecchiamento.

In tabella 1.14 sono riportati i componenti chimici principali delle fibre vegetali che, ad eccezione del cotone, contengono: cellulosa, emi-cellulosa, lignina, pectina, cere, sostanze solubili in acqua e volatili.

La cellulosa è l'elemento comune a tutte le fibre vegetali ed è un polimero lineare (non ramificato) ottenuto per policondensazione del monomero glucosio ($C_6H_{12}O_6$). Polisaccaride, incolore, inodore, insapore, di struttura fibrosa, si decompone per riscaldamento intorno ai 250-300°C. La sua formula bruta è: $(C_6H_{10}O_5)_n$, in cui *n* può assumere il valore di 14000 nella cellulosa grezza, 2500 circa in seguito al processo di raffinazione.

***Tab. 1.14*** *Composizione chimica di alcune fibre vegetali [46]*

| % | Iuta | Lino | Canapa | Kenaf | Sisal | Cotone |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Cellulosa** | 61-71 | 71-75 | 70,2-74,4 | 53-57 | 67-78 | 82,7 |
| **Emicellulosa** | 13,6-20,4 | 18,6-20,6 | 17,9-22,4 | 15-19 | 10-14,2 | 5,7 |
| **Lignina** | 12-13 | 2,2 | 3,7-5,7 | 5,9-9,3 | 8-11 | - |
| **Pectina** | 0,2 | 2,2 | 0,9 | - | 10 | - |
| **Altro** | - | 3,8 | 6,1 | 7,9 | 1 | - |
| **Cere** | 0,5 | 1,7 | 0,8 | - | 2,0 | 0,6 |
| **Acqua** | 12,6 | 10,0 | 10,8 | - | 11,0 | - |

***Tab. 1.15*** *Proprietà meccaniche e costi di alcune fibre vegetali. Confronto con le proprietà delle fibre di vetro-E [47]*

| Fibra | Densità ($g/cm^3$) | Allungamento (%) | Resistenza alla trazione (MPa) | Modulo elastico (GPa) | Prezzo/($US/kg); fibre grezze (mat/tessuti) |
|---|---|---|---|---|---|
| Cotone | 1.5-1.6 | 7.0-8.0 | 400 | 5.5-12.6 | 1.5-2.2 |
| Iuta | 1.3 | 1.5-1.8 | 393-773 | 26.5 | 0.35(1.5/0.9-2) |
| Lino | 1.5 | 2.7-3.2 | 500-1500 | 27.6 | 1.5(2/4) |
| Canapa | 1.47 | 2-4 ' | 690 | 70 | 0.6-1.8(2/4) |
| Kenaf | 1.45 | 1.6 | 930 | 53 | --- |
| Ramiè | N / A | 3.6-3.8 | 400-938 | 61.4-128 | 1.5-2.5 |
| Sisal | 1.5 | 2.0-2.5 | 511-635 | 9.4-22 | 0.6-0.7 |
| Coir | 1.2 | 30 | 593 | 4.0-6.0 | 0.25-0.5 |
| Vetro-E | 2.5 | 0.5 | 2000-3500 | 70 | 1.3(1.7/3.8) |

Il grado di polimerizzazione della cellulosa varia col tipo di fibra, mentre le proprietà meccaniche dipendono dal tipo di cellulosa in esse contenuto, nella fattispecie dipende dalla geometria della cellula elementare.

Le catene di cellulosa sono disposte parallelamente le une alle altre, formando fasci contenenti ognuno 40 o più macromolecole cellulosiche connesse tra loro per mezzo di legami ad idrogeno e tramite legami con lignina amorfa ed emicellulosa, detti microfibrille. Le unità ripetitive adiacenti nella stessa catena formano angoli di 180°. Più microfibrille si intrecciano per formare strutture simili ad una fune (Fig.1.11). Nel legno queste funi di cellulosa sono inglobate nella lignina per costituire una struttura rigida. La microstruttura delle fibre è organizzata in modo gerarchico come mostrato in figura 1.12.

L'emicellulosa è costituita da un gruppo di polisaccaridi, ad esclusione della pectina, e differisce dalla cellulosa per tre aspetti fondamentali:

1. contiene molti tipi di zuccheri diversi dal glucosio, a differenza della cellulosa che ne contiene solo un tipo.
2. la struttura delle catene è ramificata per l'emicellulosa, lineare per l'altra.
3. il grado di polimerizzazione dell'emicellulosa è dalle dieci alle cento volte inferiore a quello della cellulosa.

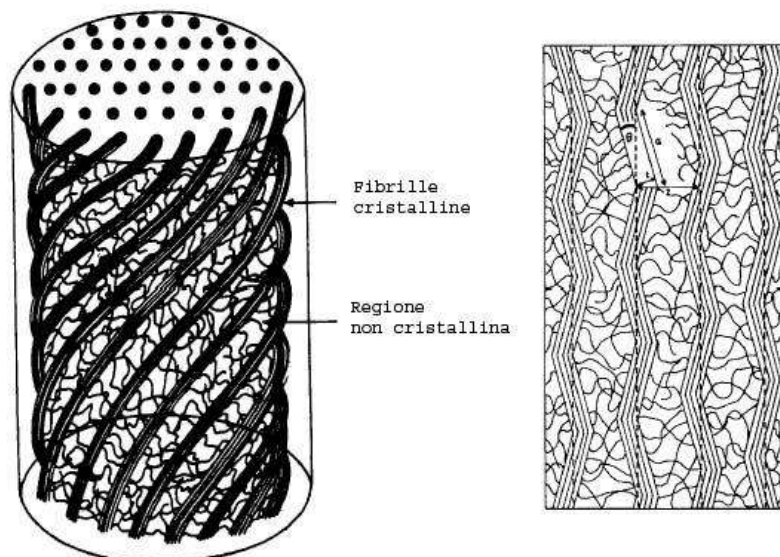



***Fig. 1.11*** *Struttura delle microfibrille*

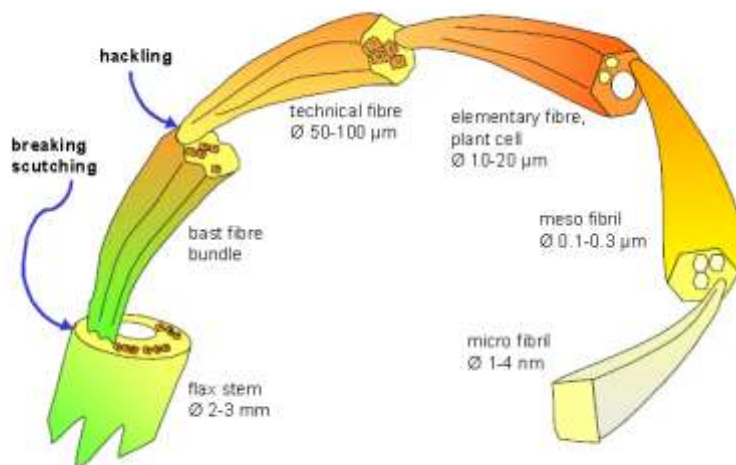



***Fig. 1.12*** *Organizzazione gerarchica delle microfibrille del lino*

La lignina è un complesso polimero di idrocarburi con gruppi alifatici e aromatici i cui legami ancora oggi non sono molto noti. Con proprietà meccaniche più basse della cellulosa, la sua struttura interna varia al variare della fibra di appartenenza. E' la sostanza che conferisce rigidità alla struttura.

La pectina è essenzialmente un eteropolisaccaride solubile in acqua dopo una parziale neutralizzazione con idrossido d'ammonio.

Le cere infine fanno parte della composizione delle fibre e possono essere estratte tramite soluzioni di acidi organici.

## 1.3.1.2 STRUTTURA FISICA

Le condizioni che determinano la composizione chimica delle fibre influenzano, in qualche modo, anche la struttura fisica.

Vi è la tendenza a confondere le fibre con le fibre in bundle (a fustello). In genere si intende con fibra la parete cellulare di una singola cellula, sia o no essa ancora in vita, quindi la grandezza di una fibra è dettata dalla grandezza della cellula. Quella dei fustelli, invece dipende dall'età. I fustelli che si trovano più in basso in una pianta sono quelli più grandi, ma anche quelli più vecchi, lignificati e rigidi.

Le proprietà meccaniche dei fustelli di fibre, generalmente chiamati fibre, dipendono non solo dalla natura chimica e dall'origine della pianta, ma in parte anche dal tipo di estrazione effettuata e dalla raffinazione del prodotto. Come convengono molti autori, i due parametri fondamentali che permettono di caratterizzare, dal punto di vista meccanico, le fibre naturali

sono: contenuto di cellulosa e angolo di spirale. In generale, la resistenza a trazione delle fibre aumenta all'aumentare del contenuto di cellulosa e al diminuire dell'angolo di spirale rispetto all'asse delle fibre (vedi Tab.1.16).

La notevole varietà di condizioni che determinano le proprietà meccaniche delle fibre non mette nelle condizioni di poter individuare valori ben precisi per i parametri di interesse [49]. Piuttosto l'intervallo è molto ampio come mostrato in tabella 1.16.

***Tab. 1.16*** *Relazione struttura-proprietà per alcune fibre vegetali*

| Plant fibre | Tensile strength (MPa) | Young's modulus (GPa) | Specific modulus (GPa) | Failure strain (%) | Length of ultimates, l (mm) | Diameter of ultimates, d (μm) | Aspect ratio, l/d | Microfib angle, θ (°) | Density (kg.m$^{-3}$) | Moisture content (eq.) (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cotton[s] | 300-700 | 6-10 | 4-6.5 | 6-8 | 20-64 | 11.5-17 | 2752 | 20-30 | 1550 | 8.5 |
| Kapok[s] | 93.3 | 4 | 12.9 | 1.2 | 8-32 | 15-35 | 724 | - | 311-384 | 10.9 |
| Bamboo[b] | 575 | 27 | 18 | - | 2.7 | 10-40 | 9259 | - | 1500 | - |
| Flax[b] | 500-900 | 50-70 | 34-48 | 1.3-3.3 | 27-36 | 17.8-21.6 | 1258 | 5 | 1400-1500 | 12 |
| Hemp[b] | 310-750 | 30-60 | 20-41 | 2-4 | 8.3-14 | 17-23 | 549 | 6.2 | 1400-1500 | 12 |
| Jute[b] | 200-450 | 20-55 | 14-39 | 2-3 | 1.9-3.2 | 15.9-20.7 | 157 | 8.1 | 1300-1500 | 12 |
| Kenaf[b] | 295-1191 | 22-60 | - | - | 2-61 | 17.7-21.9 | 119 | - | 1220-1400 | 17 |
| Ramie[b] | 915 | 23 | 15 | 3.7 | 60-250 | 28.1-35 | 4639 | - | 1550 | 8.5 |
| Abaca[l] | 12 | 41 | - | 3.4 | 4.6-5.2 | 17-21.4 | 257 | - | 1500 | 14 |
| Banana[l] | 529-914 | 27-32 | 20-24 | 1-3 | 2-3.8 | - | - | 11-12 | 1300-1350 | - |
| Pineapple[l] | 413-1627 | 60-82 | 42-57 | 0-1.6 | - | 20-80 | - | 6-14 | 1440-1560 | - |
| Sisal[l] | 80-840 | 9-22 | 6-15 | 2-14 | 1.8-3.1 | 18.3-23.7 | 115 | 10-22 | 1300-1500 | 11 |
| Coir[f] | 106-175 | 6 | 5.2 | 15-40 | 0.9-1.2 | 16.2-19.5 | 64 | 39-49 | 1150-1250 | 13 |

***Fig. 1.13*** *(a) alcune fibre vegetali; (b) fibre di canapa lavorate (fonte: University of Exeter)*

### 1.3.1.3 TRATTAMENTI SUPERFICIALI APPLICATI ALLE FIBRE VEGETALI

Le prestazioni e proprietà dei materiali compositi sia a rinforzo naturale che sintetico dipendono non solo dai singoli componenti, ma anche dalla loro compatibilità [50-58].

Il comportamento interfacciale tra fibre e matrice polimerica è stato da sempre riconosciuto come un fattore chiave che influenza le proprietà del composito [50-58]. Generalmente materiali compositi con interfaccia fibra/matrice debole hanno una relativamente bassa resistenza e rigidezza, ma alta resistenza alla frattura se la lesione cresce perpendicolarmente alla direzione delle fibre, mentre materiali con interfaccia forte hanno elevata resistenza e rigidezza, ma sono piuttosto fragili.

Per avere una buona adesione tra matrice e rinforzo bisogna che le fibre posseggano una sufficiente bagnabilità. In genere, per raggiungere tale scopo si ricorre a speciali trattamenti chimici e fisici [50-58].

I trattamenti fisici come la calandratura, lo stiramento, il termotrattamento e la produzione di filati ibridi non modificano la composizione chimica, ma solo le proprietà superficiali e strutturali, influenzando allo stesso tempo i legami meccanici. Altri tipi di trattamenti fisici, comunemente usati nei polimeri di natura petrolchimica, sono quelli che utilizzano scariche elettriche come il corona e il plasma freddo. Un vecchio metodo utilizzato

per le fibre di cotone ma applicabile alle fibre di cellulosa è la mercerizzazione, in pratica un trattamento con alcali (NaOH). Quest'ultimo, nelle sue condizioni ottimali, assicura incrementi della resistenza a trazione e migliori caratteristiche di idrorepellenza, molto importanti nella produzioni dei compositi.

Nella fattispecie, la mercerizzazione porta alla fibrillazione (rottura) delle fibre composite nelle più piccole fibre e alla riduzione del diametro col conseguente aumento del rapporto di aspetto *(aspect ratio)* superficie/volume. Inoltre, la mercerizzazione porta allo sviluppo di una topografia di superficie ruvida che si traduce in una migliore adesione all'interfaccia fibra-matrice e, quindi, un aumento delle proprietà meccaniche. Il trattamento con alcali comporta anche l'aumento del numero di possibili siti reattivi, consente una migliore bagnabilità delle fibre e determina una variazione del grado di polimerizzazione e orientamento molecolare dei cristalliti di cellulosa a causa della cementazione di sostanze come lignina ed emicellulosa che vengono rimosse durante il processo. Infatti, è riconosciuto che tale trattamento idrolizza le parti amorfe della cellulosa presente nelle fibre, in modo che dopo il trattamento il materiale contenga in percentuale più cellulosa cristallina. L'aumento di cristallinità può essere interpretato come la causa alla base dell'incremento di modulo elastico delle fibre trattate.

Inoltre, trattamenti con soda caustica portano a diminuzioni dell'angolo di spirale, e aumento dell'orientamento molecolare.

$$\text{FIBER-OH} + \text{NaOH} \rightarrow \text{FIBER-O}^-\text{Na}^+ + H_2O.$$

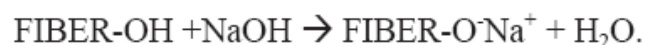



***Fig. 1.14*** *(a) Reazione chimica nel trattamento con alcali*

Se il trattamento viene fatto ad alta percentuale in volume di NaOH si potrebbe avere una eccessiva estrazione di lignina ed emicellulosa con il risultato finale che si possono danneggiare le pareti delle cellule. La rimozione di materiale non-cellulosico comporta casualità nell'orientamento dei cristallini che influenza il modulo elastico. Infatti, la rimozione dell'emicellulosa comporta che la regione posta fra le fibrille si ritrova ad essere meno densa e meno rigida col risultato che può meglio adattarsi alla direzione della deformazione. Quanto detto prima si traduce in una suddivisione meglio ripartita del carico ed in una più alta resistenza allo

sforzo di trazione. Al contrario, un ammorbidimento della matrice fra le fibrille comporta effetti negativi sul trasferimento dello sforzo fra le fibrille stesse. Rimuovendo lentamente la lignina si ottiene maggiore plasticità grazie all'eliminazione dei microvuoti nelle lamelle che uniscono le cellule fondamentali.

Il trattamento con soluzione alcalina è stato riconosciuto avere l'effetto di rimuovere la cera e i contaminati dalla superficie.

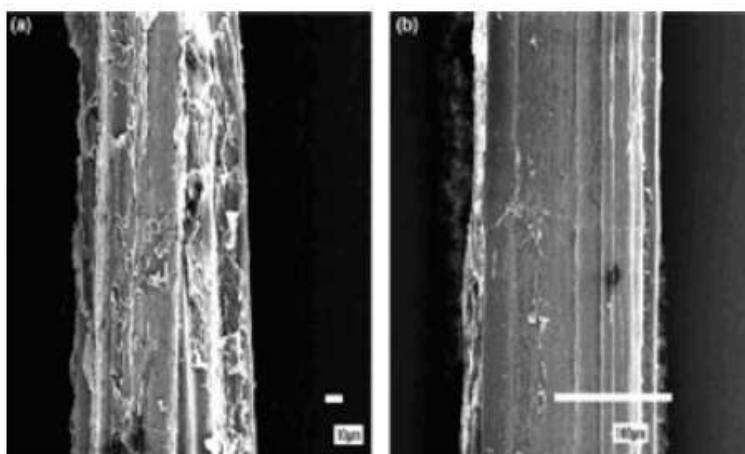



***Fig. 1.15*** *Immagini SEM di fibre di canapa non trattate (a sinistra) e trattate con NaOH (a destra)*

Le fibre di cellulosa fortemente idrofile sono incompatibili con i polimeri, essendo questi ultimi idrofobi, impedendo quindi un forte legame. Per ovviare a tale inconveniente si utilizzano i metodi chimici, ossia si impiegano agenti di accoppiamento (coupling agents) che reagiscono o si depositano sulla fibra e in alcuni casi all'interno del polimero, fungendo da ponte, mediante legami chimici, tra fibre e matrice. Tra i metodi che rientrano in questa specifica categoria vi è la copolimerizzazione ad innesto mediante reazione radicalica tra le macromolecole di cellulosa e opportuni copolimeri, come il polipropilene-anidride maleica (MAH-PP), col risultato di una più alta energia superficiale delle fibre con incrementi di bagnabilità e adesione d'interfaccia; il trattamento con composti che contengono gruppi metanolo ($-CH_2OH$) in modo da diminuire l'umidità trattenuta aumentandone la rigidezza; il trattamento con isocianati, come il polietilene-polifenil-isocianato (PMPPIC), organosilani o agenti a base di triazina.

Anche le fibre vegetali come tutte le fibre hanno sia aspetti positivi che negativi. Il lato negativo è, in particolar modo, rappresentato, dalla

sensibilità delle fibre all'umidità dovuta alla loro natura idrofila, causata dalla spiccata tendenza dei gruppi idrossilici della cellulosa a formare legami con le molecole di idrogeno. Di conseguenza la sensibilità all'umidità in un certo qual modo si ripercuote anche sul composito. Il giudizio negativo scaturisce dalla constatazione che, agendo l'acqua da sostanza separante nell'interfaccia fibra-matrice, si ha una scarsa adesione, nonché Una trattamento per ovviare all'inconveniente è l'acetilazione, ossia l'introduzione di gruppi acetile $CH_3C=O$ in quelli che contengono gruppi OH-. Test sperimentali dimostrano che l'umidità a saturazione diminuisce con l'aumentare del contenuto di acetile.

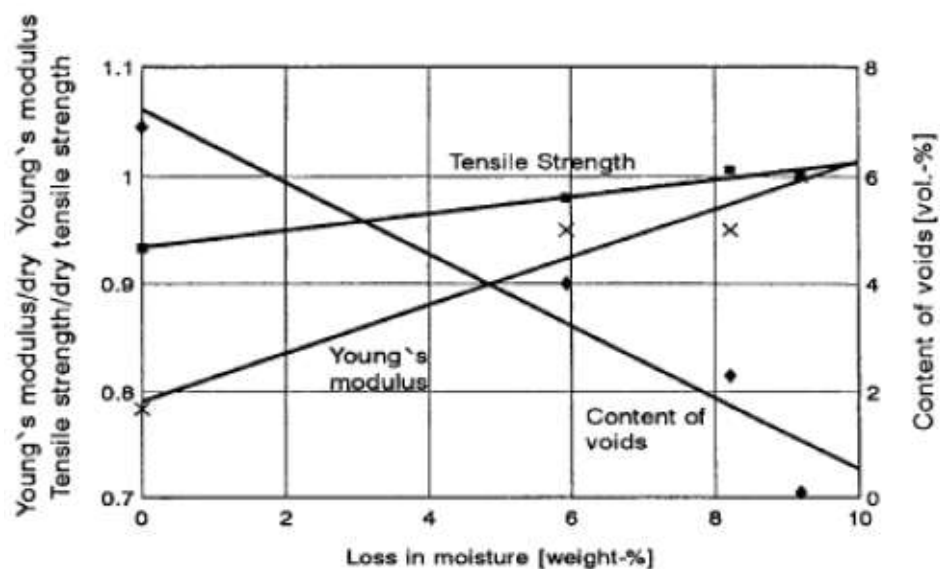



***Fig. 1.16*** *Influenza della perdita di umidità su alcune caratteristiche meccaniche per un composito resina epossidica-iuta*

L'acetilazione era originariamente applicata alla cellulosa del legno per stabilizzare le pareti cellulari contro l'umidità, migliorando la stabilità dimensionale e il degrado ambientale, e di introdurre plastificazione alle fibre cellulosiche da esterificazione. Tale processo si basa sulla reazione tra gruppi idrossilici di materiali lignocellulosici e anidride acetica a temperatura elevata. Il pretrattamento delle fibre con anidride acetica, sostituisce i gruppi idrossilici dei polimeri dalla parete cellulare con i gruppi acetile, modificando, così, le proprietà di questi polimeri in modo che diventino idrofobici. I gruppi ossidrilici che reagiscono con il reagente sono quelli della lignina ed emicellulosa (materiale amorfo), mentre i gruppi idrossilici della cellulosa (materiale cristallino) sono strettamente compressi con legami a idrogeno, per prevenire la diffusione di reagente con una conseguente estensione molto bassa di reazione.

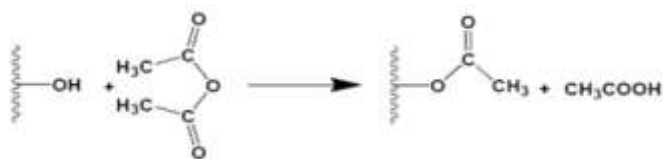



***Fig. 1.17*** *Schema della reazione di acetilazione*

La sintesi di copolimeri a innesto dalla creazione di un sito attivo, un radicale libero o un gruppo chimico che possono essere coinvolti in una polimerizzazione ionica o in un processo di condensazione, su una preesistente catena polimerica, è uno dei metodi più comuni. Il cloruro di benzoile è il trattamento più spesso utilizzato; gruppi di benzoile reagiscono con il gruppo OH delle fibre cellulosiche decrementando la natura idrofila delle fibre trattate, dopo circa 30 minuti di pre-macerazione con una soluzione di NaOH per attivare i gruppi idrossilici della cellulosa e lignina nella fibra, seguita da filtrazione e lavaggio con acqua.

Gli agenti accoppianti, di solito, migliorano il grado di reticolazione nella regione dell'interfaccia e offrono un legame perfetto.

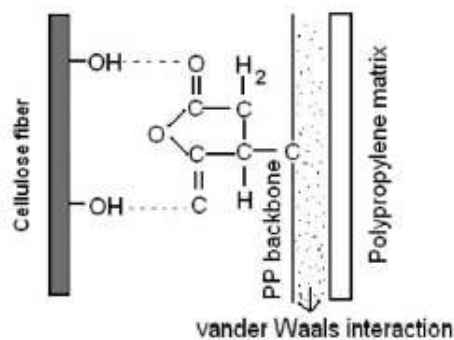



***Fig. 1.18*** *Rappresentazione schematica dell'interazione tra fibra, agenti accoppianti e matrice polimerica*

Tra i vari agenti, i silani risultano essere efficaci nel modificare la naturale interfaccia fibra-matrice. L'utilizzo dei silani nei compositi, oltre che a minimizzare la sensibilità all'umidità, ottenuta limitando la presenza di gruppi idrossilici, può contribuire a migliorare le proprietà meccaniche.

L'innesto di silani è basato sull'utilizzo di reagenti che portano gruppi terminali reattivi che, da una parte, possono reagire con la matrice e, dall'altra parte, possono reagire con i gruppi idrossilici della fibra. Gli alcossi o etossi sono i gruppi terminali che possono costituire stabili legami

covalenti reagendo con il gruppo ossidrile della fibra. I gruppi finali che possono reagire con la matrice variano a seconda del tipo di matrice polimerica.

I pretrattamenti con permanganato sono condotti utilizzando diverse concentrazioni di permanganato di potassio (KMnO4) in soluzione di acetone, con una macerazione della durata di 1-3 minuti dopo pretrattamento alcalino. A seguito del trattamento con permanganato, la tendenza idrofilica delle fibre è ridotta, e quindi l'assorbimento di acqua del composito fibrorinforzato diminuisce con l'aumento della concentrazione di KMnO4. Il trattamento con permanganato è indicato come uno dei migliori metodi per migliorare il legame nell'interfaccia fibra-polimero.

### 1.3.2 LE FIBRE DI CANAPA

La canapa è probabilmente la più antica pianta da fibra coltivata dall'uomo. In Italia era una coltura tradizionale che, a partire dagli ultimi decenni del XIX secolo, imboccò una fase di lento declino culminato negli anni '70, quando la coltura scomparve completamente dal territorio del nostro paese.

Originaria dell'Oriente. Grazie al suo ciclo vegetativo breve ed alle molte varietà esistenti, la canapa è ubiquitaria, praticamente coltivata o potenzialmente coltivabile in tutto il mondo. In passato, in Italia, era coltivata dai mille metri d'altitudine in Piemonte fino alla zona mediterranea del sud dell'Italia. Non è particolarmente esigente da un punto di vista climatico, ma raggiunge le migliori prestazioni nei climi temperati caldo-umidi che consentono lo sviluppo di grandi masse di sostanza organica. Nei paesi dove la canapicoltura è continuata ininterrotta anche dopo gli anni '70 si ha avuto un miglioramento genetico e lo sviluppo di specie caratterizzate da un basso contenuto di THC (tetraidrocannabinolo, sostanza psicotropa), come indicato dai regolamenti dell'Unione Europea (è assolutamente necessario utilizzare seme che sia stato certificato da Ente autorizzato).

La scelta della varietà è funzione del tipo di prodotto desiderato e della qualità richiesta. Attualmente, dalla canapa, si possono ricavare quattro principali prodotti semilavorati, dai quali, a loro volta, può essere derivato un gran numero di prodotti finali:

- **Fibra lunga** Tessuti per abbigliamento, arredamento, corde, tappeti, compositi
- **Fibra corta** Tessuti per abbigliamento, arredamento, carta, feltri isolanti, geotessili, compositi
- **Canapulo** Pannelli isolanti, materiale inerte per edilizia, lettiere
- **Semi** Olio alimentare, cosmetica, vernici, resine

Quando il prodotto richiesto è la fibra di buona qualità (fibra lunga) occorre disporre di piante molto alte, caratteristica che appartiene, principalmente, alle varietà dioiche quali Carmagnola, CS, Fibranova (il contenuto in fibra oscilla tra il 15-20%). Se si desidera produrre fibra corta o seme, le varietà da preferire sono le monoiche, caratterizzate da tutte piante portaseme, al contrario delle dioiche che contano invece un'alta percentuale di maschi (40-45%). Per una produzione specifica di semi, invece, è preferibile scegliere specie monoiche con un'altezza medio-bassa, per facilitare la raccolta.

***Fig. 1.19*** *Una coltura di canapa da fibra*

La canapa appartiene alla famiglia delle *Cannabinacee*. Ancora oggi, con i moderni approcci della botanica sistematica, non si è ancora in grado di delineare una netta demarcazione neppure tra i tipi coltivati e quelli spontanei.

Questa pianta erbacea è caratterizzata da abbondante biomassa e raggiunge notevoli produzioni di sostanza secca in un ciclo colturale relativamente breve. In Europa si possono superare le 20 t di sostanza secca per ettaro.

Sezionando lo stelo di una pianta di canapa si trovano differenti strati di tessuti:

- la **cuticola**, sulla quale si rileva spesso la presenza di cera avente la funzione di limitare le perdite di acqua dallo stelo;
- l'**epidermide**, rappresentata da uno strato di cellule a parete spessa, in cui si trovano gli stomi;
- la **corteccia**, rappresentata normalmente da due a sette strati di cellule;
- il **floema**, che contiene i vasi cribrosi e le fibre tessili molto spesso raggruppate in fasci di numero variabile, posizionate circolarmente nel parenchima floematico che, una volta separate dal resto del vegetale, costituiscono il "tiglio", cioè la vera e propria fibra tessile;
- il **cambio**, che separa la parte corticale dalla parte interna legnosa dello stelo, rappresentato da uno strato sottile di cellule di forma rettangolare allungata, a parete fine;
- lo **xilema**, costituito da cellule legnose, spesse e corte, che sostengono la pianta durante la crescita;
- il **midollo**, posto all'interno di una cavità localizzata, o canale midollare, se esistente, al centro dello stelo.
- Lo **xilema**, la parte legnosa dello stelo, ha forma di cilindro cavo a sezione decrescente dal basso all'alto. Allo stadio di maturità della pianta può oscillare dal 50% ad oltre il 75% in peso dello stelo. Il suo spessore varia sensibilmente dalla base, ove risulta particolarmente ampio e sviluppato - verso l'apice, dove si assottiglia fino a diventare erbaceo. Da un punto di vista istologico, lo xilema è costituito normalmente da fibre corte, relativamente larghe e ben lignificate, disposte nel senso dello stelo a formare un cilindro continuo traversato dai raggi midollari.

Probabilmente la canapa è tra le specie più efficaci per migliorare i terreni negli avvicendamenti; oltre ad essere una miglioratrice delle condizioni fisiche del terreno, non è depauperante per la fertilità e ha un effetto di contenimento sulle malerbe. La semina è possibile quando la temperatura del terreno ha ormai raggiunto i 10 ºC (da metà marzo in poi), preferibilmente intorno ai 12-14 ºC . Ritardi nell’epoca di semina possono provocare una riduzione nel numero di piante a m$^2$ ed una riduzione dell’altezza delle piante. Per ottenere fibra di alta qualità, la semina si effettua possibilmente entro marzo, usando circa 50 kg/ha (metodo tradizionalmente usato in Italia) di seme e quasi la metà nel caso di coltura

da seme (in questo caso è necessario favorire la ramificazione degli steli). La scelta della densità di investimento ha anche notevoli ripercussioni sulla produzione di seme o di altri componenti della pianta come i cannabinoidi. La raccolta della canapa, che rappresentava, in passato, una delle operazioni più faticose e penose per l'agricoltore, ed è stata una delle cause della sua scomparsa, attualmente è completamente meccanizzata; si effettua, generalmente, a partire da luglio. Le operazioni di raccolta, insieme con quelle di prima trasformazione, possono influire sulla produzione di fibra in termini quantitativi, per efficienza di estrazione, e in termini qualitativi per entità dei danni fisici sulle fibre provocati dagli organi meccanici. Un aspetto importante e innovativo è la possibilità di aumentare l'omogeneità del prodotto, adottando metodi di raccolta che consentano di separare porzioni della pianta con differenti caratteristiche qualitative. Le modalità di meccanizzazione della raccolta sono in funzione della destinazione del prodotto (industria tessile o industria cartaria, dei compositi, etc.) e delle metodologie di trasformazione proprie degli impianti di prima lavorazione. Se il prodotto è destinato all'industria tessile per la produzione di fibra lunga, è necessario che gli steli siano mantenuti paralleli per poter essere avviati alla stigliatura. Negli altri casi gli steli debbono essere trinciati in segmenti di dimensione variabile.

La produzione di fibre di canapa per scopo tessile impiega le fibre dello stelo della pianta. I passaggi fondamentali nell'estrazione della fibra di canapa, così come per tutte le altre fibre liberiane, sono:

- la macerazione, che porta alla liberazione delle fibre liberiane dagli altri tessuti a seguito della degradazione delle sostanze pectiche, costituenti principali della lamella mediana della parete cellulare;
- la stigliatura, che consiste nella separazione meccanica delle fibre tessili dal resto dei fusti. La moderna stigliatura vede l'impiego di apposite macchine dette stigliatrici, che hanno sostituito i vecchi metodi manuali o le macchine a rulli.

La resa in fibra dipende da diversi fattori quali la varietà, le condizioni del suolo, il clima e da possibili elementi di disturbo (grandine, parassiti, etc.). In linea di massima si va dalle 8-10 tonnellate di fusti per ettaro delle varietà monoiche alle 10-12 tonnellate di fusti per ettaro delle varietà dioiche (peso secco), che equivalgono ad una resa in fibra tra 2 e

3,2 t/ha. La fibra di canapa è una delle migliori fibre vegetali conosciute: resiste al calore, alle muffe, agli insetti e non viene danneggiata dalla luce.

Le fibre della canapa più interessanti dal punto di vista commerciale sono le fibre liberiane (tiglio) primarie. Le fibre si trovano lungo una circonferenza che circonda i tessuti conduttori nel fusto.

***Fig. 1.20*** Sezione trasversale di una cellula di canapa, con le fibre che circondano il fusto

La fibra primaria è costituita da cellule allungate riunite in fascetti (*bundles*), fortemente saldati tra di loro, formati durante il periodo di intenso accrescimento in altezza della pianta. La lunghezza delle fibre primarie varia dai 5 ai 55 mm con un valore medio di 20-28 mm. Il loro diametro, molto variabile, è in media di circa 32-34 μm. I filamenti sono lunghi da 1 a 3 metri.

Nella pianta sono presenti anche fibre secondarie, molto più corte, circa 2 mm, con un diametro di circa 17μm, deposte durante l'accrescimento. Oltre ad essere più corte, le fibre secondarie sono più lignificate ed hanno quindi uno scarso interesse non solo per un'utilizzazione tessile, ma anche per l'industria cartaria, per carte pregiate, dove comunque deve essere eliminata la lignina.

In base a queste semplici considerazioni sono stati proposti alcuni indici per determinare la qualità della fibra a livello della pianta: percentuale di tiglio, rapporto tra fibre primarie e fibre secondarie, lunghezza della fibra, diametro delle fibre, grado di lignificazione, omogeneità dei suddetti parametri qualitativi . La maturità delle fibre è un altro parametro importante che ne influenza resistenza e flessibilità, poiché il progressivo ispessimento della parete, a completa maturità, va praticamente ad occludere il lumen cellulare. Fra gli altri parametri che influenzano le caratteristiche della fibra,

si possono ricordare gli effetti di alcuni fattori agronomici quali l'epoca di raccolta, la densità di investimento, e la scelta varietale, ma anche metodologie di raccolta che permettano di separare frazioni di stelo differenziate per valori qualitativi.

Conoscere come le diverse caratteristiche della fibra vengano modificate dalle tecniche agronomiche risulta quindi fondamentale per studiare e sviluppare un itinerario tecnico che permetta di controllare la qualità della materia prima. Si deve comunque sottolineare come gli indici qualitativi sopra menzionati siano utili soprattutto a livello di ricerca.

### 1.3.3 LE FIBRE DI COTONE

Il cotone è sempre stata la fibra più importante per l'umanità, basti pensare che prima dell'avvento delle fibre artificiali copriva più dell'80% dei consumi.

Il cotone si ricava da varie specie di piante erbacee dicotiledoni del tipo "gossypium" che crescono nelle regioni tropicali e subtropicali. Hanno foglie lobate, fiori giallo pallido e frutto a capsula, contenente da sei ad otto semi avvolti in abbondante peluria di natura cellulosica (bioccolo o bambagia), che costituisce la fibra tessile chiamata cotone greggio. Il cultivar del cotone, per una perfetta resa, ha bisogno di climi caldi, tropicali o subtropicali (latitudine compresa tra i 45° nord ed i 35° sud), considerevole umidità, alta insolazione, terreni naturalmente molto fertili o fertilizzati artificialmente. Nata come pianta perenne, a seguito di continue selezioni e incroci, è stata trasformata in pianta annuale che completa il suo ciclo vitale in 5 o 6 mesi.

I principali produttori di cotone sono gli Stati Uniti, la Russia e la Cina, seguiti da India, Brasile, Pakistan, Turchia, Egitto e Sudan. Le specie botaniche più diffuse sono: *Gossypiurn irsutum* ed il *Gossypium barbadense*; quelle di minore importanza sono: *Gossypiuni herbaceum* ed il *Gossypium arboreum*.

***Fig. 1.21*** *La coltivazione del cotone*

La fibra viene classificata secondo standards di riferimento internazionali che ne prendono in considerazione la lunghezza, la finezza, la tenacità, la maturità (caratteri fisici naturali), la pulizia, la preparazione e l'omogeneità (caratteri fisici industriali):

- ***Lunghezza:*** varia da 10 a 60 mm ed è una delle proprietà più importanti, poiché da essa dipende la grossezza (titolo) del filato ottenibile (quanto maggiore è la lunghezza delle fibre, tanto più sottile e quindi più pregiato il filato che si può ottenere). In base alla lunghezza i cotoni posso essere classificati in: fibra corta, da 10 a 18 mm circa; fibra media, da 18 a 28 mm circa; fibra lunga, maggiore di 28 mm. Misurando le fibre che compongono un fiocchetto di cotone, si può constatare che la maggior parte di esse sono all'incirca della medesima lunghezza. Questa corrisponde alla cosiddetta lunghezza media del cotone o tiglio.
- ***Finezza:*** è un carattere molto importante perché da essa dipende il numero di fibre contenute nella sezione di un filato e, conseguentemente, la resistenza del filato stesso. La finezza varia tra i 15 ed i 35 micron e pertanto i cotoni si suddividono in: fini < 20 micron; medi, da 20 ai 25 micron; grossi, > 25 micron.
- ***Tenacità:*** dipende in massima parte dalla finezza e dal grado di maturazione delle fibre. Essa varia da 3 a 5 g/dtex ed è massima per i cotoni grossi e minima per i fini. Ad umido cresce moltissimo arrivando a 120-130 g/dtex.
- ***Elasticità:*** dipende soprattutto dal grado di maturazione, dalla fertilità del terreno e dall'umidità che essa contiene.
- ***allungamento a rottura:*** è piuttosto basso (3-7%).

- ***colore*** : non va inteso solo come maggiore o minore bianchezza della fibra, ma anche come brillantezza (lucente od opaco) e come uniformità di colore (diffuso, chiazzato, macchiato).

La fibra di cotone ha una struttura monocellulare; ogni fibra è costituita cioè da una sola cellula che, vista in sezione trasversale, appare formata da quattro parti fondamentali:

- **Cuticola**. E' lo strato più esterno composto essenzialmente da cere e contenente anche sostanze pectiche e proteiche. Serve da involucro idrorepellente e protettivo per il resto della fibra;
- **Parete primaria**. Formata da un sottile strato di cellulosa impregnato con le stesse sostanze contenute nella cuticola;
- **Parete secondaria**. Rappresenta la porzione più cospicua della fibra di cotone (circa il 90%) ed è costituita da strati concentrici di cellulosa;
- **Lumen**. E' un canale vuoto situato al centro della fibra. Esso può contenere materiale solido proveniente dal residuo secco dei protoplasma cellulare.

Come si può notare nella figura 1.22, esiste anche uno strato intermedio tra la parete primaria e quella secondaria che serve come strato di transizione tra il reticolo della parete primaria e le fibrille orientate della parete secondaria.

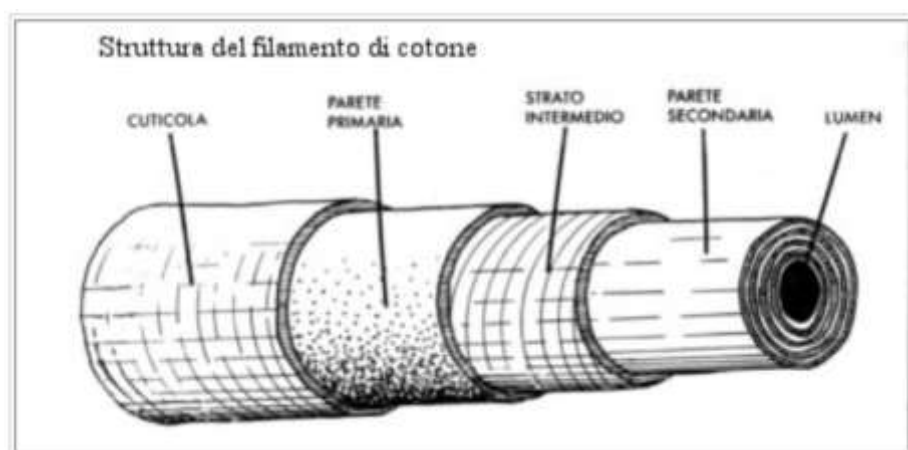



***Fig. 1.22*** *Sezione longitudinale di una fibra di cotone*

Longitudinalmente, nella fibra matura, possono essere individuate tre parti:

- **Base**. Si trova alla radice, ha forma conica, è fragile e viene staccata dal resto della fibra durante la sgranatura del cotone;
- **Corpo**. Rappresenta oltre i 3/4 della lunghezza della fibra; ha un diametro costante per quasi tutta la sua lunghezza (12-50 micron), con pareti ispessite ed uno stretto lumen centrale;
- **Punta**. Parte terminale che misura sino ad un quarto della lunghezza totale della fibra; ha diametro inferiore al corpo, assenza di lumen e forma cilindrica.

Quando la pianta giunge a maturazione la fibra si disidrata afflosciandosi sul lumen e assumendo un aspetto nastriforme che bene si evidenzia all'osservazione microscopica. I filamenti si presentano appiattiti e avvolti su se stessi con sottili striature superficiali e con un piccolo canale centrale.

Le proprietà meccaniche della fibra umida possono essere migliori rispetto a quelle della fibra secca e tale caratteristica rende il cotone assai resistente al lavaggio con acqua. Il comportamento nei confronti dei reagenti chimici si può sintetizzare come segue:

- Buona resistenza agli alcali, agli ossidanti (ipoclorito, acqua ossigenata) ed ai solventi organici; i capi di cotone possiedono quindi una elevata lavabilità in tutte le condizioni (a secco ed a umido, con saponi e detersivi);
- Scarsa resistenza agli acidi;
- Buona tingibilità.

Il cotone si pianta generalmente tra marzo e aprile, la temperatura ideale nel momento della semina non dovrebbe essere inferiore ai 18°C, quella ottimale è di circa 35°C, e successivamente giunge a fioritura dopo due o tre mesi; quando il fiore appassisce, rimane la capsula che si sviluppa ancora per sei settimane fino a diventare una grossa noce contenente i semi avvolti da una bianca peluria di fibra.

Giunta a maturazione, la capsula si apre e compare il bioccolo bianco e peloso; a questo punto si inizia il raccolto.

La raccolta, che si compie entro 7-10 giorni dall’apertura delle capsule, può essere fatta a mano o con macchine. La raccolta manuale è la più lunga e la più costosa ma è quella che dà i migliori risultati (per i cotoni di alto pregio è ancor oggi la più adottata, perché solo raccogliendo a mano è

possibile operare una selezione del prodotto scartando le fibre immature e le materie estranee).

***Fig. 1.23*** *La raccolta del cotone con mezzi meccanici*

I semi raccolti passano in apposite macchine sgranatrici al fine di separare la fibra; si ottiene così il cotone greggio o bambagia che, con apposite presse, viene ridotto in balle per essere avviato agli stabilimenti di lavorazione.

Le balle così ottenute sono avviate alla filatura dove il cotone, battuto e ulteriormente pulito, viene poi cardato, ottenendo un cordone o nastro di fibre orientate casualmente. Per i tipi più fini si esegue la pettinatura che parallelizza e seleziona le fibre più lunghe; il nastro viene poi passato alla filatura dalla quale uscirà o un filalo cardato peloso e meno regolare, o un filato pettinato più pregiato, liscio e compatto.

***Fig. 1.24*** *Fiore e bacca di cotone*

## 1.3.4 LE FIBRE DI LINO

Il lino è la fibra tessile che si ricava dal fusto dell'omonima pianta erbacea appartenente alla famiglia delle linacee. Le fibre sono i vasi conduttori che trasportano l'acqua dalle radici alle foglie, sottili come capelli e lunghi, dai 60 ai 120 cm circa, come lo stelo.

Il lino è una fibra composita ricavata dal libro del *Linum usitatissimum* (lino) composta per circa il 70% da cellulosa. Come tutte le fibre liberiane, il lino ha una lunghezza media delle fibre elementari che varia dai 20 ai 30 mm; la sua finezza si aggira dai 20 ai 30 micron; la fibra presenta una sezione poligonale. Il numero di fibre presenti nella corteccia di una singola pianta può variare da 20 a 50.

Originaria dell'Asia Minore, I Babilonesi e gli Egiziani usavano corde di lino per innalzare i blocchi di pietra per le loro costruzioni e di lino erano anche le bende in cui erano avvolte le mummie dei Faraoni. Il lino si coltiva oggi in regioni a clima temperato umido, soprattutto in Europa (Francia, Olanda e Romania) e nelle repubbliche europee dell'ex URSS.

Il lino è una pianta annuale, con un ciclo vegetativo di circa quattro mesi.

Su un terreno arato e pareggiato si effettua la semina dei semi mediante una macchina seminatrice. Le piante sono seminate molto fitte, così durante la successiva crescita non avranno possibilità di prendere vigore e resteranno quindi esili. In questo modo anche i vasi conduttori resteranno sottili e le fibre saranno fini e morbide.

Dopo circa tre mesi le piante hanno già un stelo alto circa 1 metro, con foglie sparse e strette. Il fiore può essere bianco o azzurro, a seconda della qualità. Alla fine del quarto mese gli steli verranno raccolti con una macchina che li sradica da terra senza tagliarli. Così facendo la fibra non viene accorciata e conserva la lunghezza della pianta. Inoltre la pianta viene raccolta prima della maturazione dei semi, per evitare la lignificazione, ossia un irrigidimento delle cellule che si impregnano di lignina, che danneggerebbe la finezza della fibra stessa.

***Fig. 1.25*** *Pianta di lino dal fiore viola*

***Fig. 1.26*** *Steli e fibre grezze di lino*

Dopo il raccolto, le piante vengono raccolte in fasci e le cime vengono battute per recuperare il seme.

Le fibre del lino sono contenute nella parte interna della corteccia, chiamata comunemente tiglio. Per ricavarla occorre quindi separare le fibre della pianta, saldate tra loro dalla pectina, che costituisce quindi un collante naturale. Ciò si ottiene con la macerazione dei fusti in acqua stagnante o, più modernamente e rapidamente, in cisterne piene d'acqua riscaldata a circa 30° per 4-14 giorni, allo scopo di sciogliere la pectina, per separare, grazie all'azione dei batteri, la fibra dalla foglia.

Dopo l'essiccazione al sole dei fasci macerati, altri trattamenti meccanici (stigliatura) separano la parte fibrosa dalla parte legnosa e da altre impurità : con la maciullatura, il materiale viene fatto passare tra due serie di rulli, per separare le sostanze legnose ed estranee dalla fibra vera e propria, chiamata filaccia.

Successivamente le fibre sono sottoposte alla pettinatura che permette la separazione delle fibre troppo corte e spezzate (stoppe) dalle fibre lunghe

che quindi vengono disposte parallelamente tra loro per pi comporle in matasse ed avviarle alle successive operazioni di filatura e tessitura.

Il lino più pregiato è quello raccolto non ancora maturo. Il colore dipende i parte dal tipo di macerazione subita dagli steli e varia dal bianco al giallognolo al

grigio; il più pregiato è un bianco-argenteo lucente, serico. Le stoppe, fibre corte e spezzate, costituiscono un sottoprodotto della lavorazione del lino e sono utilizzate come materia prima nell'industria cartaria e nella preparazione di cordami.

Dai semi del lino si ottiene l'olio, utilizzato nell'industria delle vernici e del linoleum ed in farmacia come emolliente e lassativo.

Le fibre del lino, ricavate dal fusto, sono lunghe 50-60 cm: ciò conferisce loro resistenza meccanica superiore a quella del cotone e migliore attitudine ad essere filate. Poiché le fibre contengono, oltre alla cellulosa, grassi e cere, il lino possiede una brillantezza e un aspetto sericeo molto apprezzati in campo tessite. La presenza dei grassi e delle cere, invece, è non gradita nel campo dei materiali compositi.

L'elevata conducibilità termica e la conseguente sensazione di freschezza che trasmette quando viene indossato è una ulteriore proprietà che fa del lino una fibra tessile pregiata e dal costo piuttosto elevato.

Sebbene ancora oggi gli impieghi della fibra di lino sono quasi esclusivamente tessili, in particolare la fibra è ricercata nella produzione di capi d'abbigliamento per la stagione estiva, risultano numerose ricerche sul suo impiego anche nel settore della produzione dei materiali compositi a matrice polimerica.

Le fibre di lino provengono dai vasi liberiano delle piante, ossia dal tessuto vascolare che si trova a ridosso della corteccia. Le cellule base sono delle fibre elementari aventi lunghezza media di 2-5 cm e un diamtero compreso tra 7 e 30 micron. Le cellule sono costituite da pareti spesse e lignificate che racchiudono un piccolo canale centrale vuoto, ossia il lumen. Le pareti delle fibre sono stratificate e attraversate da fini canicoli, in parte ramificati, in cui la parete cellulare è più sottile: tali formazioni consentono gli apporti nutrizionali quando le cellule sono in vita. La parete cellulare può essere suddivisa in strati concentrici in cui si distinguono:

- una cuticola esterna, costituita da cere pectine e proteine;
- una parete cellulare primaria(0,2 micorn);

- tre pareti secondarie che racchiudono il lumen (5-15 micron), successione di strati a diversa composizione in cui le fibrille di cellulosa, altamente cristalline e a diversa orientazione, sono incapsulate in una matrice amorfa di emicellulosa e lignina;

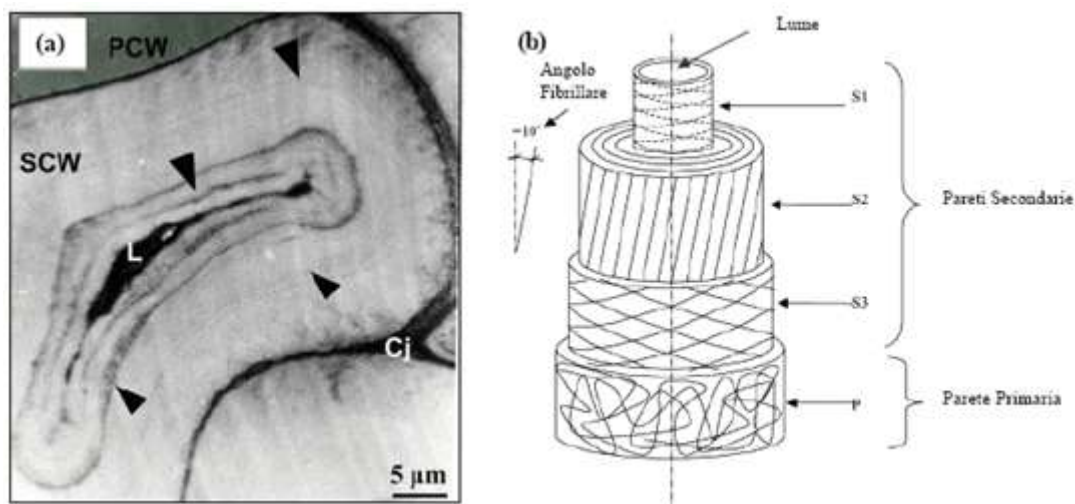



***Fig. 1.27*** *Struttura di una fibra di lino. PCW parete cellulare primaria, SCW pareti cellulari secondarie Lumen*

## 1.3.5 LE TIPOLOGIE DI RINFORZO

Al di là della loro origine e delle oro propiretà, le fibre disponibili in commercio, poiché sono costituite da filamenti continui molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente, vengono commercializzate in varie forme, di cui le più comuni sono [59]:

- filamento (*monofilament)*: elemento base con dimensioni di circa 10 µm di diametro;
- cavo di filatura (*tow*): è il prodotto della macchina di filatura ed è costituito da un fascio formato da un gran numero di filamenti (dell'ordine delle migliaia), praticamente senza torsione, destinato ad essere filato, ritorto o strappato per l'utilizzazione sotto forma di fibra discontinua;
- filo o filato *(spun yarn)*: filo formato da fibre tenute insieme da torsione;
- filo assemblato *(roving)*: fascio costituito da filati assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale.

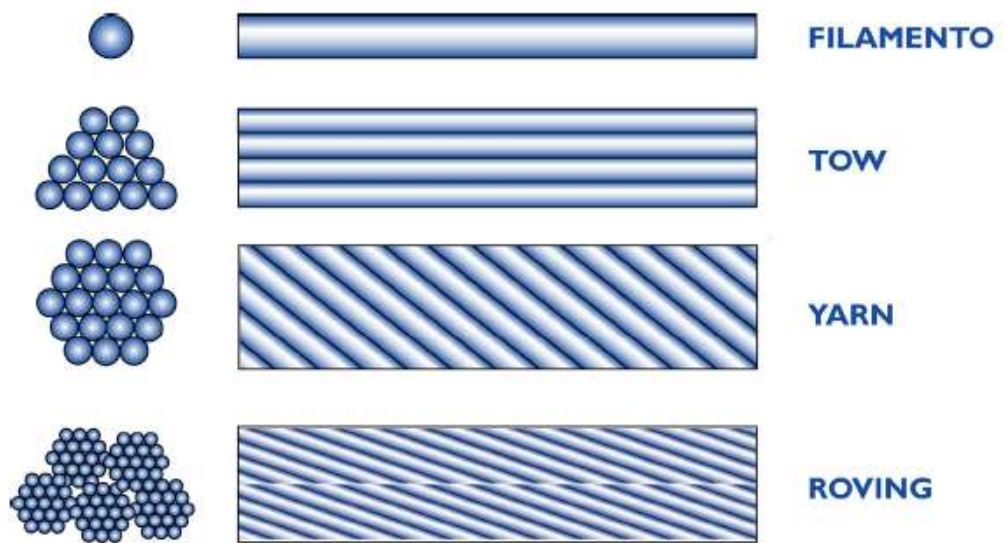



***Fig. 1.28*** *Tipologie commerciali di fibra*

Combinando insieme alcune centinaia di *tows* o *yarns* si ottiene il *tape*, in cui i *tows* o gli *yarns* possono essere semplicemente affiancati oppure cuciti tra loro o fissati su un supporto.

***Fig. 1.29*** *Roving di fibre di canapa e lino*

La classificazione delle fibre è mutuata direttamente da quella tradizionalmente utilizzata per le fibre tessili.

***Fig. 1.30*** *Yarn di canapa e microscopia a scansione elettronica (SEM) di un yarn di canapa*

I filamenti costituenti i filati sono caratterizzati essenzialmente dalla composizione chimica e dalla massa per unità di lunghezza. L'unità di misura della massa lineare o titolo (massa per unità di lunghezza)secondo la norma ISO 2974:2000(E) è il Tex, equivalente a 1 g per km di fibra. Un'altra unità di misura di massa lineare, ormai obsoleta, è il denaro (*denier*), che equivale a 0.111 Tex.

Per alcune fibre, la classificazione è più articolata, ad esempio, la designazione tecnica delle fibre di vetro viene effettuata secondo le norme ISO 1139:1973(E) e ISO 2078:1993(E) e consta dei seguenti elementi:

- una lettera che identifica il tipo di vetro utilizzato;
- una seconda lettera che indica il tipo di fibra utilizzato:
- C (iniziale di "Continuo", per i filamenti);
- D (iniziale di "Discontinuo", per le fibre discontinue);
- un numero che indica il diametro nominale (in μm) del filamento;
- un numero, separato da uno spazio, che indica la massa lineare della fibra in Tex;
- il senso e il valore di torsione, espresso in giri/m (opzionale);
- il numero di fili costituenti i ritorti (opzionale);

- un codice del produttore contenente tutte quelle informazioni, non odificate, ritenute indispensabili per caratterizzare il prodotto (opzionale).

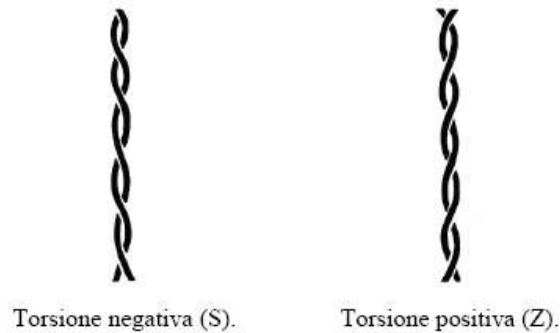



***Fig. 1.31*** *Versi di torsione per uno yarn*

Un importante parametro per quanto concerne i filati in fibre naturali è sicuramente il grado di torsione. È stato infatti dimostrato che filati con un basso grado di torsione possiedono basse σ quando vengono testate isolatamente; inoltre non possono essere utilizzate in processi quali la pultrusione o intrecciate con la tecnica del weaving in quanto le forze in gioco portano alla rottura dei filati nella fase di processo. Di contro, un altro grado di twist rende difficoltosa l'impregnazione da parte della matrice quando questi materiali sono usati come rinforzo nei compositi. Bisogna quindi trovare un buon compromesso tra la necessità di ottenere un filato resistente  e la possibilità di questo di venire impregnato.

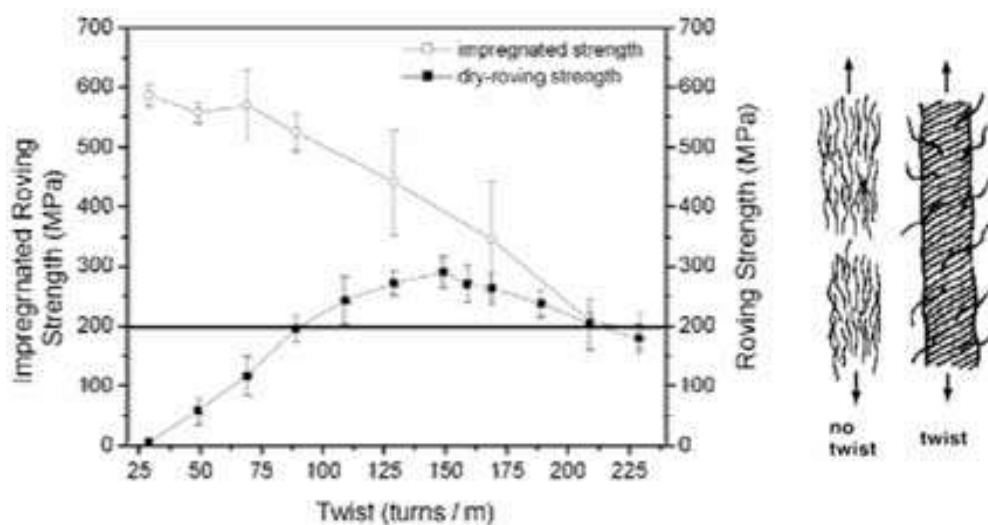



***Fig. 1.32*** *Effetto del livello di qwist sulle caratteristiche meccaniche [60]*

Alcuni esempi di designazione, con la relativa interpretazione, sono elencati di seguito:

- EC10 40: filamento continuo di vetro E, di 10 μm di diametro e di massa lineare pari a 40 Tex.
- EC9 34 Z 40: filamento continuo in vetro E, avente 9 μm di diametro e di massa lineare pari a 34 Tex, ritorto a 40 giri/m. La lettera Z indica una torsione definita come positiva secondo la norma ISO 1139:1973(E) (la torsione negativa viene indicata con la lettera S).
- EC9 34 Z 160 x 4 S 150: la lettera "x" indica che si tratta di un filo costituito da più filamenti identici. La sigla che precede la "x" identifica le caratteristiche dei filamenti, come visto in precedenza; il numero successivo (4) indica il numero dei filamenti e la lettera S una torsione negativa, effettuata a 150 giri/m.
- EC9 x 4 S 150: designazione semplificata del precedente filamento.

Alcuni filati (*yarn*), comunemente usati per i compositi strutturali, corrispondono alla sigla EC5 10 x 2, a base di vetro E, oppure alla sigla SC5 4 x 2, a base di vetro S.

Per le fibre di carbonio si è soliti classificare i filati in termini di "k" dove il simbolo k sta per "migliaia": ad esempio un filato da 1k sarà costituito da 1000 filamenti (66.6 Tex), uno da 3k (200 Tex) ne conterrà 3000, ecc. Valori tipici sono: 0.5k, 1k, 3k, 6k, 12k, 18k, 24k, 48k.

# 1.3.5.1 CARATTERISTICHE TECNICHE DEL FILATO

In genere, i filati non sono commercializzati come materiali per il rinforzo strutturale, in quanto costituiscono la materia prima per la fabbricazione dei tessuti. Le aziende produttrici possono mettere a disposizione le caratteristiche del filato ed i relativi certificati di conformità allo scopo di tutelare i loro clienti. Di seguito viene proposta la struttura di una scheda tecnica tipo del filato. Essa risulta esauriente per numero e tipo di informazioni fornite. La normativa internazionale di riferimento è la ISO 2113:1996(E).

Per determinare o verificare il titolo di un filato è possibile operare secondo la normaISO 1889:1997(E). Si preleva, cioè, dal tessuto un

campione di filato di lunghezza definita e se ne effettua la pesatura; il valore del titolo è dato dal rapporto:

$$T_x = \frac{P \cdot 1000}{L}$$

essendo $T_x$ il titolo del filato, espresso in Tex [g/km];

*P* il peso del campione, espresso in grammi;

*L* la lunghezza del campione, espressa in metri.

L'area, in $mm^2$, della sezione trasversale di un filo o di una matassa (*yarn*, *tow* o *roving*), *A*, è determinabile a partire dal titolo e dalla densità del filato mediante la seguente relazione:

$$A = \frac{T_x}{\rho \cdot 1000}$$

essendo ρ la densità del filato, espressa in g/cm3

$T_x$ il titolo, espresso in Tex.

La valutazione delle suddette quantità può essere utile per un controllo di qualità del prodotto fornito.

# 1.3.5.2 TIPOLOGIE DI TESSUTO

I tessuti per il rinforzo strutturale sono comunemente distribuiti allo stato secco ed in rotoli, da utilizzare per l'impregnazione in cantiere con apposite resine. Possono essere:

- unidirezionali, con le fibre tutte orientate nella direzione della lunghezza e tenute insieme da un trama leggera di tipo non strutturale;
- bidirezionali, costituiti da una tessitura trama-ordito ortogonale di solito bilanciata (stessa percentuale di fibre nelle due direzioni);
- multiassiali, con fibre orientate in diverse direzioni del piano.

Oltre che in forma di *yarn* o di *roving*, le fibre sono, quindi, anche disponibili commercialmente in composizioni opportunamente arrangiate in modo da formare una grande varietà di tessuti (*fabric*). In tal caso la

disposizione delle fibre può essere tale da conferire ai corrispondenti compositi delle caratteristiche di quasi isotropia nel piano. Nei tessuti si distingue una direzione principale, detta ordito (*warp*), ed una trasversale ortogonale alla prima, detta trama (*weft*).

I tessuti multiassiali, nei quali le fibre sono orientate in più di due direzioni del piano, possono essere costituiti da fili intessuti o semplicemente cuciti tra di loro.

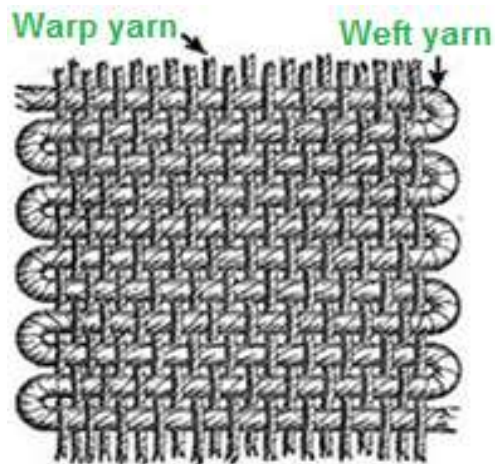



***Fig. 1.33*** *Trama (Weft) e Ordito (Warp) in un "plain weaving"*

I tre stili di base della tessitura sono:

- Armatura a tela (plain weave)
- Raso (satin weave)
- Batavia o Saia (twill weave)

In figura 1.34 sono riportate le geometrie dei tessuti che più frequentemente ricorrono nelle applicazioni correnti. La rappresentazione è conforme alla seguente convenzione:

- casella nera o tratteggiata = filo di trama sopra il filo di ordito;
- casella bianca = filo di trama sotto il filo di ordito.

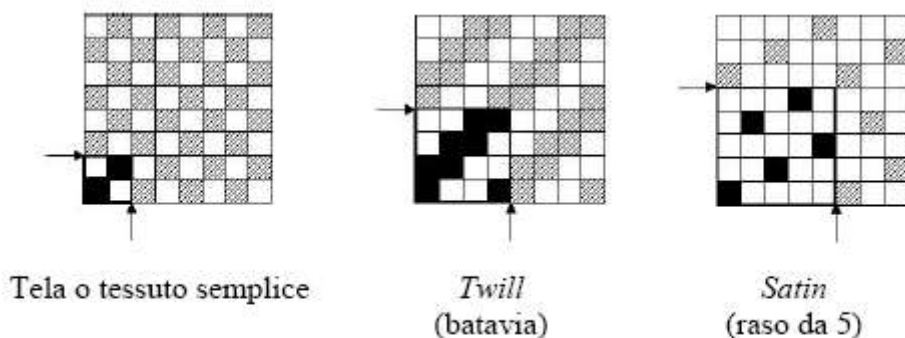



***Fig. 1.34*** *Schema geometrico dei più comuni tessuti*

L’armatura a tela è il tipo più semplice di tessile. L’ordito e la trama sono allineate in modo da formare un semplice schema incrociato. Ciascun filo di trama attraversa i fili dell'ordito come mostrato nello schema seguente. Stesso discorso vale per i fili di ordito. Nei tessuti bilanciati, l'ordito e la trama sono fatti di fili dello stesso peso (dimensione) e lo stesso numero di terminazioni per unità di lunghezza.

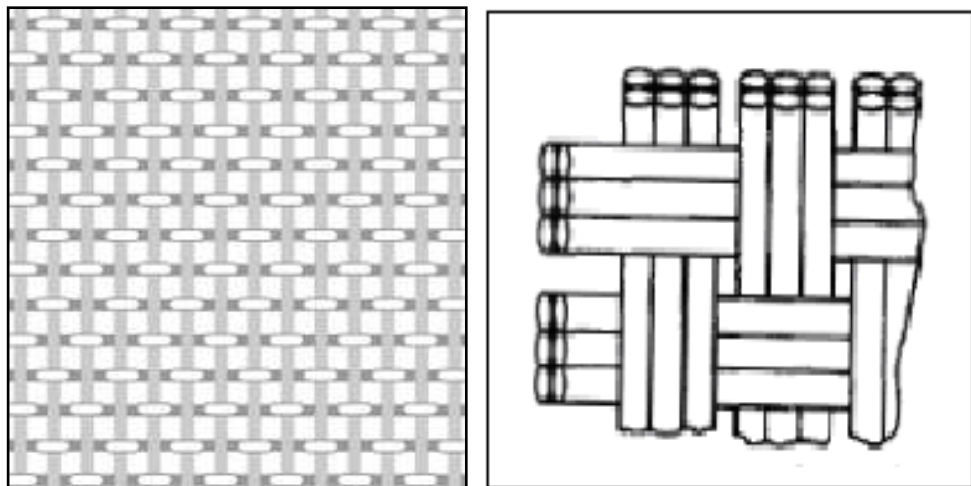



***Fig. 1.35*** *Plain woven yarn (direzione del rinforzo 0°/90°)*

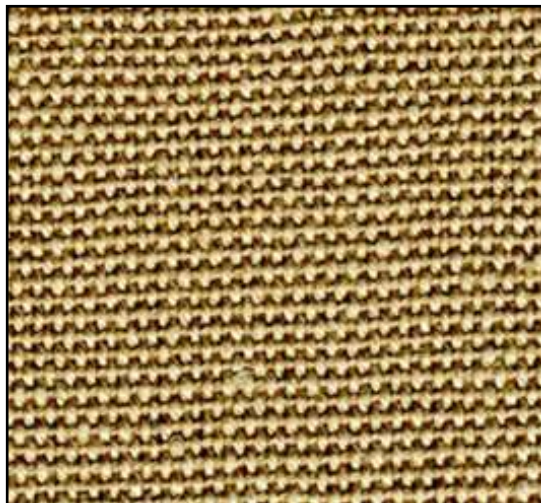



***Fig. 1.36*** *Esempio di plain woven con yarn di lino.*
*H-181 100% Hemp Canvas weave 18oz/sq yd Wide 59" 5N/2 x 8N/2 x23x21.*
*Fonte: dongpinghemp.com*

Il tessuto satin è caratterizzato da quattro o più fili di trama che passano sopra un filato ordito o viceversa, quattro fili di ordito passanti su un singolo filo di trama.

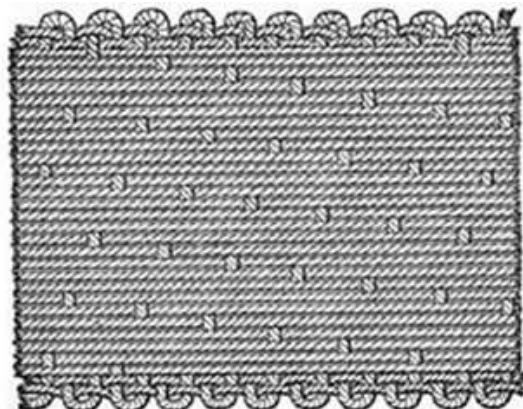



***Fig. 1.37*** *Tessuto satin weave con 16 filati di ordito sopra ciscun filato di trama*

Il Twill è un tipo di tessuto con un motivo di nervature diagonali parallele ed è spesso designata con una frazione, es. 2/1, in cui il numeratore indica il numero di filati su cui il filato di trama passa sopra e il denominatore indica il numero di filati da cui passa sotto . Il motivo è generato dal passaggio di un filo di trama su uno o più fili di ordito e poi sotto uno o più fili di ordito e così via. A causa di questa struttura, il twill in genere si adagia bene alle superfici.

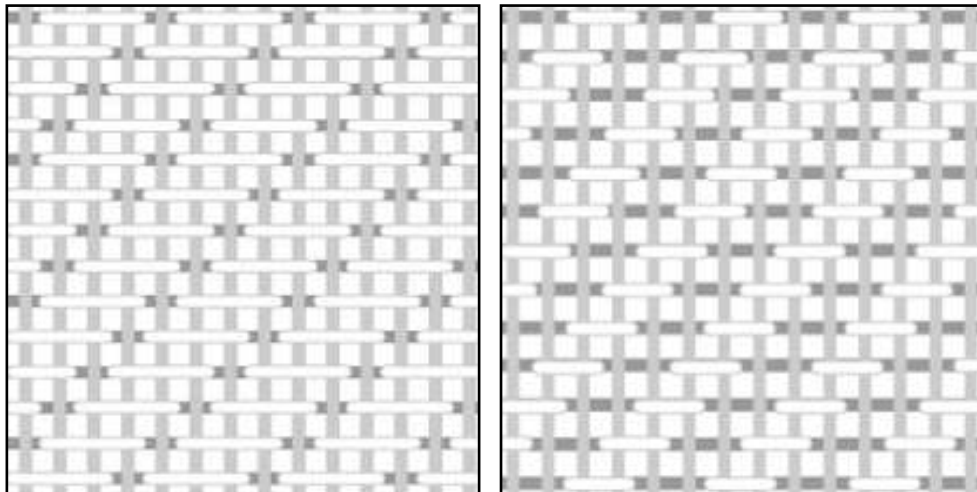



***Fig. 1.38*** *Struttura dei twill 3/1 e 2/2*

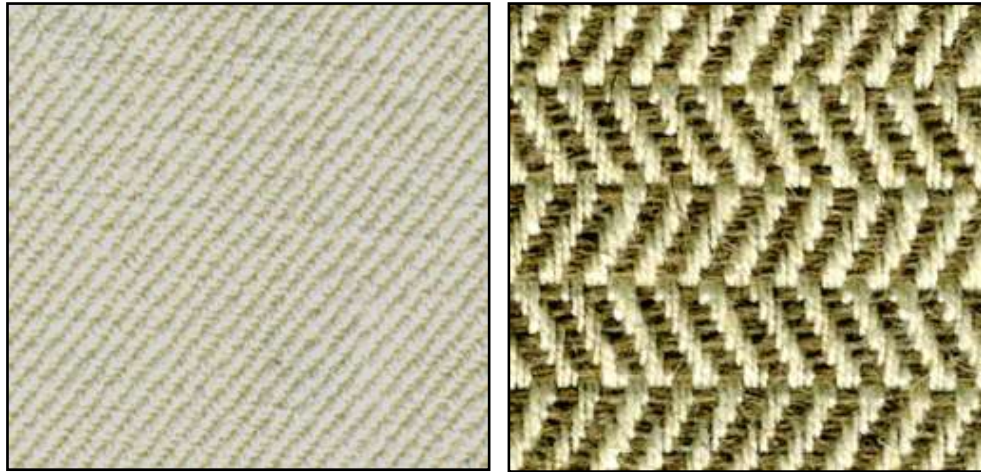



***Fig. 1.39*** *Esempi di plain woven con yarn di lino.*
*(A) Natural Twill Weave 100% Hemp 12oz Width 57/58" (B) Natural Herringbone Weave 52% Hemp 48% Flax 20oz Width 57/58".*
*Fonte: EnviroTextile.com*

L'esiguo numero di intrecci nei twill permettono di muoversi più liberamente e, quindi, sono più morbidi e più flessibili, da cui si ottiene una migliore adattabilità alle superfici. Quando ci sono meno intrecci, i filati possono essere confezionati vicini con una elevata densità, quindi, consentono di ottenere compositi con una elevata percentuale di rinforzo.

C'è un numero crescente di produttori di tessuti di fibre naturali in tutto il mondo che stanno perfezionando i loro prodotti tessili per l'industria dei compositi. La seguente tabella, mostra il prezzo per una selezione di tessuti commercializzati negli USA da parte della società LLC EnviroTextile.

***Tab. 1.17*** *Tabella con alcuni prezzi dei tessuti commercializzati da EnviroTextile*

| Fabric Descriptions and Specifications | Units = Yards | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1-49 | 50-99 | 100-499 | 500-999 | 1K-2999 | 3K-4999 |
| Natural 100% Hemp Canvas Plain Weave, 16n/2x7n, 41x28, Width 57/58" 12oz Semi-Bleached, Preshrunk, Cationic Softener, SBP® 100% | $14.60 | $12.00 | $11.10 | $10.30 | $10.00 | $9.65 |
| Natural 100% Hemp Canvas Basket Weave, 10n/3x 10nm/3. 30x20, Width 57/58" 18.5oz Semi-Bleached, Preshrunk, Cationic Softener, SBP® 100% | $16.45 | $13.50 | $12.55 | $11.60 | $11.30 | $10.90 |
| Black 100% Hemp Canvas Basket Weave, 10n/3x 10nm/3, 30x20, Width 57/58" 18.5oz, Preshrunk, No Softener, SBP® 100% | $17.60 | $14.45 | $13.40 | $12.40 | $12.05 | $11.65 |
| Dark Brown 100%Hemp Canvas Basket Weave, 10n/3x 10n/3, 30x20, Width 57/58" 18.5oz Semi-Bleached, Preshrunk, No Softener, SBP® 100% | $17.60 | $14.45 | $13.40 | $12.40 | $12.05 | $11.65 |
| Sand 100 % Hemp Canvas Basket Weave, 10n/3x 10n/3, 30x20, Width 57/58" 18.5oz Semi-Bleached, Preshrunk, No Softener, SBP® 100% | $17.60 | $14.45 | $13.40 | $12.40 | $12.05 | $11.65 |
| Natural 100% Hemp Herringbone Weave, 16nm/2x8.5nm, 41x27, Width 55/56" 10.5oz Soft Finish, SBP® 100% | $14.95 | $12.30 | $11.40 | $10.55 | $10.25 | $9.90 |

Altri esempi di prodotti commerciali disponibili sul mercato sono i tessuti di lino prodotti da Biotex (http://www.compositesevolution.com) che sono disponibili anche come tessuto pre-impregnato di PLA (polylacticacid) e PP (polipropilene ). Altri prodotti disponibili sono i tessuti pre-impregnati (FLAXPLY ©) prodotti da Lineo. I prodotti venduti da Lineo hanno fibre pre-trattate per aumentare l'adesione fibra-matrice. Il FLAXPLY © sono proposti per essere utilizzati come strato interno misto di carbonio/lino nella progettazione per l'assorbimento delle vibrazioni.

***Fig. 1.40*** *Biotex Flax 3x3 twill 420g/m$^2$*

Accanto alle suddette tipologie, ne esistono altre quali, ad esempio, il *crowfoot*, il *basket* e il leno.

Sono infine disponibili anche tessuti tridimensionali, in cui la presenza di una seconda "trama" in direzione ortogonale al piano impartisce maggiore resistenza e conferisce al prodotto proprietà particolari (ad esempio, la capacità di rigonfiarsi quando vengono impregnati con la resina).

Per tessuti multiassiali, oltre alle indicazioni generali riguardanti il tipo di filato e le altre caratteristiche del tessuto, deve essere riportata anche l'orientazione di ciascuno strato di fibre.

Nel seguito sono illustrati esempi relativi alla determinazione di alcune quantità caratteristiche dei tessuti utilizzati per il rinforzo strutturale.

Nel caso in cui siano forniti solo il titolo del filato e la geometria, la determinazione della massa per unità di superficie delle fibre in una determinata direzione può essere eseguita attraverso la seguente relazione:

$$p_x = \frac{T_x \cdot N_f}{10}$$

nella quale $p_x$ è la massa del tessuto o della componente del tessuto nella direzione interessata, espressa in g/m$^2$;

$T_x$ è il titolo del filato riferito alla direzione in esame, espresso in Tex [g/km],

$N_f$ è il numero di fili per unità di larghezza riferiti alla direzione in esame [n$^o$/cm].

Ad esempio, dato un tessuto unidirezionale caratterizzato da 3.8 fili/cm e da un titolo del filato di 800 Tex, la massa per unità di superficie risulta essere:

$$p_x = \frac{800\ [Tex] \cdot 3.8[\frac{fili}{cm}]}{10} = 304\ g/m^2$$

Nel caso in cui sia necessario determinare il numero di fili disposti in un'assegnata direzione per unità di lunghezza nella direzione ortogonale, si può operare secondo la norma ISO 4602:1997(E): si contano cioè i fili disposti in direzione ortogonale su una base prefissata del tessuto (larga ad esempio 10 cm) e si riconduce tale numero proporzionalmente all'unità di lunghezza prescelta.

Qui di seguito viene riportata a titolo di esempio la struttura di una scheda tecnica tipo per tessuti mono e bidirezionali. La struttura suggerita risulta esauriente per numero e tipo di informazioni fornite.

**SCHEDA TECNICA: tessuto non impregnato**

IL PRODUTTORE DEVE RIPORTARE I VALORI STATISTICI NECESSARI PER LA VALUTAZIONE DELLE RESISTENZE CARATTERISTICHE (AD ESEMPIO MEDIA, SCARTO QUADRATICO MEDIO, POPOLAZIONE, FRATTILE, INTERVALLO DI CONFIDENZA).

**Descrizione tessuto**

Tipo di armatura (tela, batavia, raso, spina, ecc.), tipo di filato (trama e ordito), altri componenti oltre alla trama ed all'ordito (finissaggi, velo, filo legatura, ecc.), ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

**Caratteristiche del tessuto**

| Proprietà | Direzione del filato | Unità di misura | Metodo di prova normativa di riferimento |
|---|---|---|---|
| titolo filato | ordito | Tex | ISO 1889:1997(E) |
| | trama | Tex | |
| densità filato | | $g/cm^3$ | |
| n° fili/cm | ordito | n°/cm | ISO 4602:1997(E) |
| | trama | n°/cm | |
| massa (peso) | totale | $g/m^2$ | ISO 3374:2000(E) |
| | ordito | $g/m^2$ | |
| | trama | $g/m^2$ | |
| modulo di elasticità normale a trazione | ordito | MPa | |
| | trama | MPa | |
| resistenza a trazione (valore medio e caratteristico) | ordito | [N] | ISO 4606:1995(E) (textile glass) ISO 13934-1:1999(E) |
| | trama | [N] | |
| deformazione a rottura | ordito | % | ISO 4606:1995(E) (textile glass) ISO 13934-1:1999(E) |
| | trama | % | |

**Caratteristiche del filato**

Vedere scheda tecnica filato

**Condizioni di stoccaggio**

Descrizione

**Precauzioni d'uso e sicurezza**

Descrizione

**Indicazioni sull'utilizzo del prodotto in un sistema di rinforzo**

Il produttore può fornire indicazioni relative ad altri prodotti da abbinare al tessuto per la realizzazione del sistema di rinforzo quali, ad esempio, le resine da impregnazione, eventuali rivestimenti protettivi, *primer*, *putty*, ecc. Tali informazioni devono essere corredate da risultati di prove di compatibilità eseguite sul sistema completo (vedere § 2.5).

La normativa generale di riferimento è la UNI 8099:1980.

***Fig. 1.41*** *Scheda tecnica di accompagnamento di un tessuto secondo le norme CNR*

Quando un tessuto è costituito da fibre lunghe e/o da fibre corte *(chopped)* (cioè fibre discontinue di lunghezza tipica compresa tra 25 e 50 mm) disposte casualmente nel piano e tenute assieme da un legante chimico, si parla di *tessuto-non-tessuto* o *mat*, come mostrato nella seguente figura. La larghezza dei *mat* è variabile tra 5 cm e 2 m; la loro densità di massa è dell'ordine di 0.5 kg/m$^2$.

***Fig. 1.42*** *Tessuto non tessuto di fibre di canapa*

## 1.4 GLI ECO-COMPOSITI NELL'INDUSTRIA MODERNA

Negli ultimi anni l'industria sta cercando di diminuire la dipendenza dei prodotti dai combustibili a base di petrolio a causa della maggiore consapevolezza ambientale. Questo sta portando alla necessità di indagare su materiali sostenibili ecocompatibili in sostituzione di quelli convenzionali esistenti [61-78].

L'enorme aumento della produzione e l'uso di materie plastiche in ogni settore della nostra vita conducono a enormi sprechi di plastica, quindi, di risorse preziose. Gli attuali e crescenti problemi di smaltimento, come pure i forti regolamenti e criteri per il rispetto dell'ambiente emanati dagli organi competenti, hanno indirizzato gran parte della ricerca scientifica verso l'introduzione degli eco-materiali compositi.

Tra i diversi tipi di eco-compositi quelli che contengono fibre naturali (NF) e polimeri da fonti naturali rinnovabili, meglio se riciclabili e/o biodegradabili, hanno un ruolo chiave [61-78].

Da qualche anno sono apparse in commercio molte matrici polimeriche eco-compatibili e recentemente alcuni ricercatori hanno cominciato ad

analizzare la possibilità di introdurvi le fibre naturali [61-78] in modo da ottenere materiali completamente "*environmentally friendly*" (eco-compositi) che a fine vita possano essere degradati nell'ambiente o smaltiti mediante compostaggio. Dall'altro lato, grazie all'introduzione di rinforzi, gli eco-polimeri possono raggiungere prestazioni più elevate ed essere utilizzati in campi più ampi, con conseguente incremento nella produzione. In questo modo sarà possibile ridurre il prezzo di tali materiali che tuttora sono impiegati solo in applicazioni di nicchia, e renderli competitivi economicamente sul mercato [61-78]

Gli eco-compositi biodegradabili possono essere impiegati come materiali resistenti, con un tempo di vita programmato alla fine del quale vengono degradati nell'ambiente senza richiedere interventi di rimozione, costosi in termini di tempo e denaro. Tuttora la principale applicazione dei biocompositi è nel terreno come geotessili prodotti biodegradabili che non causano problemi alla fine del loro impiego o se ingeriti da animali: tessuti di protezione da grandine, sole, gelo, animali, di nuove piantine nei rimboschimenti e nei raccolti, anelli di sostegno dei vitigni in agricoltura ecc.

Considerando il prezzo elevato delle matrici eco-compatibili che rappresenta la principale limitazione all'uso diffuso, attualmente il primo passo verso il raggiungimento di compositi eco-friendly è l'uso di fibre naturali come rinforzo anche in matrici sintetiche anche non eco-friendly.

Le fibre naturali rappresentano una classe convenzionale di materiali rinnovabili che, al giorno d'oggi, stanno vivendo un grande risveglio. Negli ultimi anni ci sono state molte ricerche sviluppate nel campo delle plastiche rinforzate con fibre naturali [61-78]. La maggior parte di esse sono basate sullo studio delle proprietà meccaniche dei materiali compositi rinforzati con fibre corte. I materiali così ottenuti vengono impiegati principalmente per la produzione di parti non strutturali per l'industria automobilistica, come coperture, pannelli per portiere e tettucci delle auto [61-78] ma anche nel settore dell'industria civile, del packaging e di molti altri beni di consumo.

***Fig. 1.43*** *Esempi di applicazioni di fibre naturali nel settore automotive*

***Fig. 1.44*** *Esempi di applicazioni di fibre naturali in diversi settori commerciali*

## 1.4.1 IL SETTORE AUTOMOTIVE

L'uso delle fibre naturali è diventato relativamente comune nelle automobili europee [61-78] grazie alle buone proprietà sopra elencate e in particolare alla possibilità di ottenere veicoli più leggeri (che si traduce in una riduzione del consumo di carburante). A partire dal 1994 con la Mercedes Classe E, i cui interni sono rinforzati con fibre di juta, gli autoveicoli di numerose case automobilistiche sono stati costruiti con interni rinforzati con fibre naturali.

Anche dal punto di vista normativo si ha avuto un impulso a tale diffusione, infatti, a partire dal 2005 la Comunità Europea ha imposto la produzione di autovetture riciclabili almeno per l'85% di cui l'80% recuperabili sotto forma di materiali da riciclo e il resto sotto forma di recupero energetico.

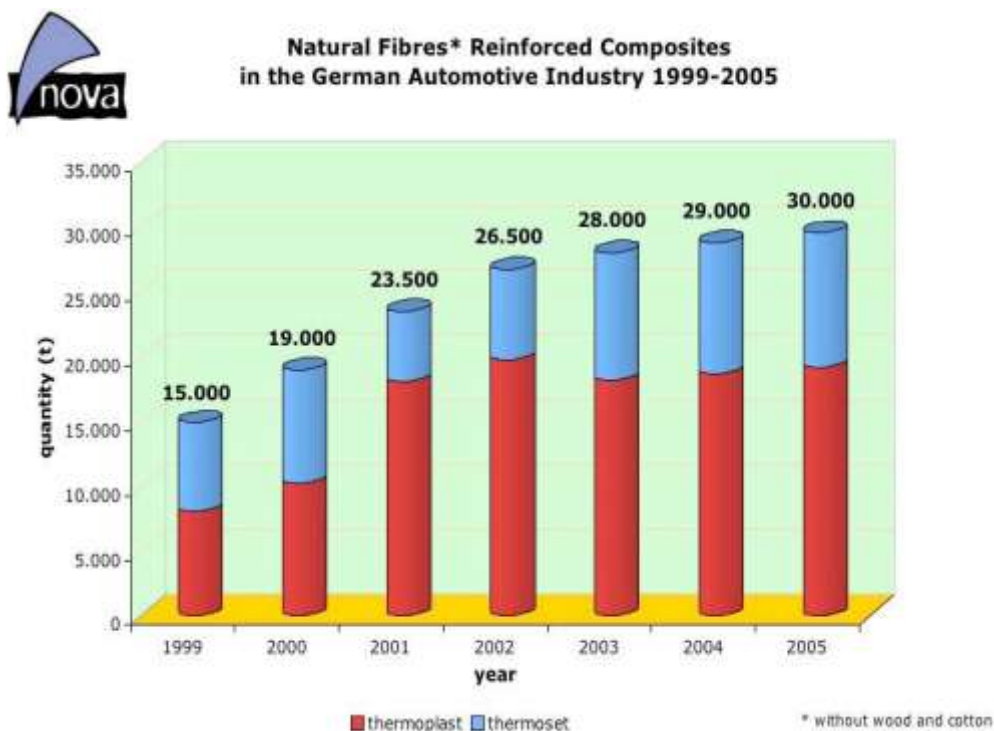



***Fig. 1.45*** *utilizzo delle fibre naturali nel settore automotive in Germania (fonte: Nova Institute- Germania)*

L'ostacolo principale alla riciclabilità delle automobili è rappresentato sopratutto dai pannelli di rivestimento interni, fabbricati per lo più con materiali polimerici e fibre di vetro che non sono degradabili nè combustibili, quindi, non si può attuare alcun recupero energetico.

La tendenza attuale dell'industria automobilistica è perciò quella di utilizzare compositi preparati attraverso stampaggio a compressione di poliolefine (PP e PE) con fibre naturali medio-lunghe (80- 90 mm) in forma di feltri o di tessuto non tessuto, come componenti per gli interni: pannelli di porte anteriori (che contengono in media 1.2-1.8 Kg di fibre naturali), di porte posteriori (0.8-1.5 Kg), di portabagagli (1.5-2.5 Kg), cappelliere (oltre 2 Kg) ecc. [61-78].

La scelta di un certo tipo di fibra vegetale da utilizzare come rinforzo, dipende dal prezzo e dalla possibilità di coltivare la pianta da cui si ricava la

fibra nel paese produttore dell'automobile. Per esempio diverse parti dei veicoli commerciali della Mercedes prodotti in Brasile utilizzano fibre di cocco, sisal e lino, mentre in Italia nel 1999 la Fiat è stata coinvolta in un progetto che sperimentava l'introduzione di fibre di ginestra (Progetto Spartium) in matrici termoplastiche.

Le matrici utilizzate per i compositi in ambito automobilistico sono varie: il polipropilene (PP) è largamente utilizzato per applicazioni ad alto volume nelle quali la velocità di produzione è un requisito; i poliesteri termoplastici sono preferiti al PP se è richiesta resistenza a temperature superiori; i poliesteri insaturi sono utilizzati per applicazioni a piccolo e medio volume; i poliuretani per applicazioni a medio-alto volume; le resine epossidiche in quelle applicazioni che necessitano di elevate prestazioni meccaniche. Tutte queste matrici sono utilizzate con fibre di vetro e possono essere applicate alle fibre vegetali.

Borealis ha sviluppato un ampia gama di PP denominati Daplen per pannellature automobilistiche. Altre serie di prodotti (ie.GB) disponibili sono quelli modificati con fibre di vetro. Le proprietà di questi prodotti sono riportate in tabella 1.18.

Sabic, Dow e LyondellBasell sono altri produttori leader nella vendita di PP per il settore automobilistico.

Per le pannellature del corpo macchina LyondellBasell ha sviluppato un intera gamma di prodotti denominati Hifax. Per le applicazioni sotto il cofano e le applicazioni strutturali LyondellBasell propone una serie denominata Hostacom che è rinforzata con fibre di vetro.

Una classe speciale di materiali realizzata con fibre di vetro E "miscelati" con filati in PP o PET è commercializzata dalla Owens Corning con il nome Twintex. Il materiale Twintex offre vantaggi considerevoli in quanto è lavorabile per stampaggio sotto vuoto e con diaframma garantendo, al contempo, proprietà simili o superioni ai materiali lavorati con stampaggio a compressione.

***Tab. 1.18** Proprietà di alcuni prodotti commerciali in PP rinforzato in vetro per applicazioni automobilistiche (fonte:TDS Borealis)*

| **Properties** | **Test Method** | **GB205U** | **GB311U** | **Xmod GD302HP** | **Neopol GB402HP** |
|---|---|---|---|---|---|
| Processing method | - | Injection Moulding | Injection Moulding | Injection Moulding | InjectionMoulding Extrusion |
| Application | - | Technical components exposed to high heat and loads; Washing machine parts; Under the bonnet components | Technical components exposed to high heat and loads; Washing machine parts; Under the bonnet components | Dashboard carriers Door module carriers Structural seat parts | Front end carriers Dashboard carriers Door module carriers Structural parts Technical components exposed to high heat and loads |
| Glass FiberContent | ISO 1183 | 20 | 30 | 30 | 40(long fiber) |
| Density / [Kg/m$^3$] | ISO 1183 | 1040 | 1120 | 1160 | 1240 |
| Melt Flow Rate/[g/10min] | ISO527-2 | 2.2 | 2.0 | 3.3 | 2.0 |
| Tensile Modulus/[MPa] | ISO527-2 | 4800 | 6800 | 5600 | 9000 |
| Tensile Strength/[MPa] | ISO527-2 | 75 | 97 | 65 | 140 |
| Tensile Strain/[%] | ISO75-2 | 4 | 3 | 4 | 2 |
| Heat Deflection temperature (1.8MPa)/[°C] | ISO 179/1ea | 140 | 145 | 132 | 162 |
| Charpy Impact Strength, notched (23°C)/[kJ/m$^2$] | ISO 179/1ea | 10.5 | 11 | 24 | 28 |
| Charpy Impact Strength, notched -(20°C)/[kJ/m$^2$] | ISO 179/1ea | 7.5 | 9 | 13 | 32 |
| Charpy Impact Strength, unnotched (23°C)/[kJ/m$^2$] | ISO 179/1ea | 45 | 50 | 65 | 57 |
| Charpy Impact Strength, unnotched -(20°C)/[kJ/m$^2$] | ISO 179/1ea | 42 | 45 | 60 | 55 |
| Izod Impact Strength, notched (23°C)/[kJ/m$^2$] | ISO 179/1ea | 10 | 11 | 28 | 31 |
| Izod Impact Strength, notched -(20°C)/[kJ/m$^2$] | ISO 179/1ea | 8 | 8 | 16 | 34 |

Per le resine poliestere insature, che sono tra le più diffuse, esistono svariati prodotti commerciali da differenti compagnie, tra le più importanti: Reichold, Dow, Ashland, ScottBader, DSM, Cray Valley, Polyone, Hexion

etc. Reichold, per esempio, offre una vasta serie di prodotti con il nome Polylite. Le proprietà di alcuni gradi di Polylite sono riportate in tabella 1.19. La maggioranza delle compagnie che vende resine poliestere ha in catalogo anche resine epossidiche adatte al settore automobilistico.

Bayer ha lanciato sul mercato un preimpregnato innovative denominato Baypreg®F che è caratterizzato da una matrice poliuretanica. Baypreg®F è progettato per la produzione di interni automobilistici tramite stampaggio a compressione. Rivestimenti interni a parete sottile e fodere leggere possono esser prodotte con questo prodotto con un processo a minor impatto ambientale essendo il rinforzo in fibre vegetali. Altri prodotti simili ma con matrice a base di PP sono venduti da FlexForm Technologies.

Recentemente, l'aumento di pressione sulle questioni ambientali ha spinto molti produttori di resine a sviluppare e lanciare sistemi che contengono determinati quantitativi di monomero da fonte rinnovabile. Per esempio, Reichold propone un sistema denominato ENVIROLITE® 31325-00. Questa resina è una sistema mediamente reattivo con bassa viscosità basata sulla chimica poliestere insatura. Nello specifico, questo prodotto è basato su olio di soia e ha un contenuto di monomero "green" di circa il 25%.

DSM ha introdotto due resine *bio* per l'industria automobilistica- una resina termoindurente per produrre pannelli per il corpo macchina e, un termoplastico adatto all'utilizzo nel vano motore. La resina termoindurente, Palapreg® ECO P55-01, è progettata per essere usata nei processi SMC e BMC in applicazioni che vanno dai pannelli non a vista a pannelli esterni in classe A. Questo sistema contiene un 55% di monomeri da fonte rinnovabile. La seconda resina *bio*, denominata EcoPaXX™, è basata su una poliammide (PA410) ad alte presazioni, basso assorbimento di umidità e eccellente resistenza a sostanze chimiche. Circa il 70% del materiali è derivato da olio di ricino. Le applicazioni in campo automobilistico includono componenti nel vano motore in cui la resistenza chimica e idrolitica è essenziale.

***Tab. 1.19*** *Proprietà di alcuni gradi di Polylite (fonte: Reichold)*

| Tradename | Description |
|---|---|
| **POLYLITE® 230-413** | Medium reactive polyester resin based on orthophthalic acid and neopenthylglycol. POLYLITE® 230-413 has excellent hydrolytic stability and very good chemical resistance. The resin is non-accelerated and highly thixotropic and is especially designed for relining/CIPP applications |
| **POLYLITE® 31516-00** | POLYLITE® 31516-00 resin was designed for use in applications where excellent gloss characteristics, fast cycle times and line speeds are desirable. POLYLITE® 31516 has been uniquely designed to yield both high crosslink density and excellent toughness. This resin system produces profiles with excellent surface gloss, very good toughness, good corrosion resistance and excellent mechanical properties. |
| **POLYLITE® 31660-02** | POLYLITE® 31660-02 is a high reactive medium viscose unsaturated polyester resin designed for SMC / BMC and Pultrusion. The resin can be thickened with Magnesium oxide and is used together with NORPOLI® low shrink or low profile additives in Low Shrinkage (LS) - or Low Profile (LP) - SMC / BMC applications. |
| **POLYLITE® 32366-20** | OLYLITE® 32366-20 is a low reactivity, low viscosity flexible polyester resin formulated for use in automotive body patch compounds. POLYLITE® 32366-20 is formulated specifically to provide good adhesion to steel substrates and imparts outstanding toughness and ease of sanding to putty manufactured with it. It is also designed to cure with minimal exotherm, which reduces overall shrinkage. |

Altre resine commericializzata come *bio* sono il sistema Envirex della Ashland e la Super Sap della Entropy Resins. Componenti sotto il cofano, strutturali e pannellature possono essere prodotto con le resine della Entropy Resins. L'impatto ambientale delle resine della Entropy è ridotto utilizzando olio di pino ottenuto come sottoprodotto della lavorazione della polpa di legno e oli vegetali ottenuti dagli scarti della lavorazione dei biocombustibili.

Come sostituti naturali alle matrici termoplastiche derivate dal petrolio la scelta è, per lo più, tra il PLA e le matrici derivate dalla cellulosa. Diversi produttori offrono questi sistemi ma, al momento, il loro uso è limitato dai costi più alti rispetto alle matrici tradizionali.

### 1.4.1.1 APPLICAZIONE DEI COMPOSITI A BASE DI FIBRE NATURALI

Sin dai primi anni ’30, Henry Ford studio l’applicazione di svariati materiali naturali, tra i quail: cantalupi, carote, mais, cavoli e cipolle, come base per la realizzazione di macchine con corpo organico. Il modello T della Ford, realizzato tra il 1908 e il 1927, aveva alcune parti realizzate con matrici derivate dalla soia. Nel 1941 Ford dimostrò la resistenza di questo materiale colpendo con una mazza il prototipo (Fig. 1.46 ). Ford reclamava, per questo materiale, una resistenza all’impatto 10 volte superiore al metallo.

***Fig. 1.46*** *Henry Ford che dimostra le resistenza di un autovettura realizzata in canapa e resina a base di soia*

L’interesse verso i materiali naturali diminuì con l’affermarsi di materiali più durevoli, come i metalli, e sino agli anni ’40 le fibre naturali non tornarono in auge. Nel 1950 il corpo della macchina della Germania dell’Est, la Trabant, fu uno dei primi veicoli a essere costruito in fibra naturale. Il cotone fu utilizzato impregnandolo con resina poliestere.

Negli anni ’90, la Daimler Chrysler iniziò a utilizzare fibre di lino e agave per i rivestimenti interni dei suoi veicoli. L’interesse per questi materiali continuò sino alla realizzazione dei pannelli degli sportelli della Mercedes Benz E- Class nel 1996 (**Fig. 1.47**).

***Fig. 1.47*** *Mercedes Benz E: componenti in fibra naturale*

Nel 2000 la direttiva Europea 2000/53/EC ha promosso l'uso di prodotti compatibili con l'ambiente e che riducano il conferimento in discarica. La direttiva stabiliva che la frazione conferita per veicolo fosse pari al 15% nel 2005 e si riducesse, gradualmente, al 5% nel 2015. Questa direttiva e altre simili pubblicate in USA, hanno spinto diverse OEM a proseguire e sviluppare l'utilizzo di materiali compositi con fibre naturali. Oggigiorno, esistono svariati modelli di automobili che utilizzano diversi componenti basati su fibre naturali.

I produttori Tedeschi Mercedes (Daimler/Chrysler), BMW, e Audi/Volkswagen sono i più attivi nel definire e qualificare materiali a base di fibre naturali rispetto a produttori di massa. Tuttavia, poiché i fornitori di componenti di questi produttori sono gli stessi dei produttori di massa si è verificato e continua a verificarsi un trasferimento di competenze tra queste aziende. Oggigiorno, tutti i modelli BMW e Mercedes usano fibre naturali per alcuni componenti quali: fodere, rivestimenti e cappeliere. Altri OEM, ad esempio Ford, Opel, Renault, Peugeot, Citroen e FIAT lavorano meno alla definizione dei materiali ma li utilizzano ugualmente.

***Tab. 1.20*** *Compositi in fibra naturale per diversi modelli di automobili (DP: door panel, IP: instrumental panel)*

| Material | Fibres | Resin | Preferred body parts | In Production |
|---|---|---|---|---|
| Fibrit HFFS | Wood fibre | Acryl resin dispersion | IP.DP. air channel | IP:Opel Astra, Zafira, Volvo V40 DP: Opel Astra, Zafira |
| Fibrowood | Needle feed wood fibre mat | Acryl resin dispersion | IP and DP. Seat adjustment | IP: DC A-class, New Compact Car Mitsubishi Colt, Smart 44 DP: New Compact Car Mitsubishi Colt, Opel Astra, DC DP, C219 |
| Fibropur | Flax/hemp/sisal fibre mat | polyurethane | DP | DP:DC S/E-class |
| Natural fibre-EP | Bast fibre mat | Epoxy resin | DP | DP:BMW5 series |
| EcoCor | Bast/PP fibre | PP fibre (Thermoplastic) | DP, Inserts, seat adjustment | Inserts: Renault Clio |
| Polixil | Wood flour (extrudate plates) | PP (thermoplastic) | DP | Seat adjustment: Opel Zafira DP: DC W 251 Dp: Fiat punto, Bravo, Alfa 147,155 |
| FibreTec | Coir fibre | Latex | Seat upholstery | DC: Diverse series |

***Tab. 1.21*** *Costruttori di automobili e modelli che utilizzano le fibre naturali*

| Automotive manufacturer | Model and application |
|---|---|
| Audi | A2,A3,A4, A4 Avant, A6, A8, Roadstar, Coupe: Seat back, side and back door panel, boot lining, hat rack, space tire lining |
| BMW | 3,5 and 7 series and others: door panels, headliner panel, boot lining, Seat back |
| Daimler/Chrysler | A, C, E, S class: Door panels, windshield/dashboard, business table, piller cover panel; A class, Travego bus: exterior under body protection trim; M class: instrumental panel (Now in S class: 27 parts manufactured from bio fibres, weight 43kg) |
| Fiat | Punto, Brava, Marea, Alfa Romeo 146, 156 |
| Ford | Mondeo CD 162, Focus: Door panels, B-piller, boot liner |
| Opel | Astra, Vectra, Zafira: Headliner panel, door panels, pillar cover panel, instrumental panel |
| Peugeout | New model 406 |
| Reanault | Clio |
| Rover | Rover 2000 and others: Insulation, rear storage shelf/panel |
| Saab | Door panels |
| SEAT | Door panels, seat back |
| Volkswagen | Golf A4, Passat Variant, Bora: Door panel, seat back, boot lid finish panel, boot liner |
| Volvo | C70, V70 |
| Mitsubishi | Space star: Door panels; colt: Instrumental panels |

Johnson Controls, uno dei principali fornitori di panneli di sportelli di FIAT e tra i maggiori fornitori mondiali, presenta una vasta gamma di materiali compositi a base di fibre naturali sviluppati internamente. Fibrowood, ad esempio, è un composito con matrice acrilica e fibre derivate dal legno che può essere trasformato per stampaggio a compressione in stampi ad alta temperatura. Il contenuto di fibra nel Fibrowood è del 70%. Questo prodotto è utilizzato per: copertura di sportelli; coperture per pannelli di strumentazione, coperture per sedili. Fibrowood è in produzione dal 1998 ed è utilizzato da Ford, Kia, Mercedes-Benz, Opel, Hyundai.

***Fig. 1.48*** *Pannello per sportello in Fibrowood*

Fibrit è un prodotto realizzato con processi simili alla produzione della carta. Il contenuto di fibra naturale è pari al 94%. Questo alto contenuto assicura al prodotto stabilità di prezzo rispetto alle variazioni delle risorse da combustibile fossile. Fibrit è basato su fibre derivate dal legno e un legante acrilico. Fibrit è in produzione dal 1954 ed è utilizzato da Opel. La figura seguente mostra un pannello per sportello realizzato in Fibrit.

***Fig. 1.49*** *Pannello per sportello realizzato in Fibrit*

Johnson Controls produce anche compositi con fibra naturale (lino o canapa) impregnati con resina epossidica. Questi pre-impregnati sono lavorati per stampaggio in presse ad alta temperatura. Il contenuto di fibra naturale dichiarato è del 70%. Il materiale è in produzione dal 2003 ed è utilizzato da BMW.

***Fig. 1.50*** *Pannello realizzato con fibre naturali e resina epossidica*

Johnson Controls ha fatto passi avanti considerevoli introducendo anche cicli virtuosi di utilizzo del materiale in produzione. Ad esempio, gli scarti del processo di punzonatura dei mat naturali, quali il Fibrowood, sono lavorati e legati con PP per produttore dei granuli di PP rinforzato. I granuli prodotti sono lavorati per stampaggio ad iniezione per produrre fermi, ganci e braccioli. Questo materiale è in produzione dal 2006 ed è utilizzato per lo più da Mercedes-Benz.

***Fig. 1.51*** *Prodotto realizzato con fibre naturali riciclate e PP*

Visteon ha lanciato un prodotto denominato R-flax che consiste di PP rinforzato con paglia di lino e fibre corte.

***Fig. 1.52*** *Prodotto realizzatocon R-flax*

Fornitori come Johnson Control focalizzano la loro attenzione anche su prodotti interamente realizzati con materiali naturali. Ad esempio, Fasertec è una linea di prodotto basata su fibre da noce di cocco e latex naturali. Questo composito è al 100% naturale. Le proprietà del Fasertec permetteno ottime performance per sedili e poggiatesta. Questo prodotto è in commercio dal 2002 ed è utilizzato da Maybach, Mercedes-Benz, Volkswagen.

***Fig. 1.53*** *Sedile realizzato in FaserTec*

WOOD-STOCK è un altro prodotto diffuso nel mercato automobilistico. Questo prodotto è un foglio estruso in termoplastico costituito da una matrice poliolefinica e un mat in fibra naturale. Nella fase di trasformazione il mat è pre-riscaldato in un forno all'infrarosso e poi stampato in uno stampo a bassa temperatura. Questo prodotto è sul mercato dal 1982 ed è utilizzato da FIAT, Lancia e Alfa Romeo.

***Fig. 1.54*** *Pannello realizzato in WOOD-STOCK*

Un altro prodotto disponibile per i produttori di automobile è il preimpregnato Acrodur della Basf, basato su un copolimero acrilico che permette di ottenere contenuti di fibra dal 70 al 90%. La chiave del prodotto è la realizzazione di un preimpregnato con struttura porosa che ha permesso al produttore Dräxlmaier Group di eliminare le fasi di punzonatura laser necessari con i termoplastici convenzionali necessari per l'applicazione del vuoto durante la laminazione. Con questo prodotto si realizzano gli sportelli della serie 7 della BMW.

***Fig. 1*** *Preimpregnato Acrodur*

***Fig. 2*** *Pannelli per sportelli della BMW realizzati in Acrodur*

Faurecia, un altro fornitore mondiale, ha sviluppato una linea denominata Lignoflex, che utilizza il 70% di fibra derivata dal legno un 20% di PET e un 10% di legante basato su resina fenolformaldeide. Questo prodotto presenta pesi e costi ridotti rispetto ai compositi termoplastici rinforzati in vetro e migliori caratteristiche di assorbimento acustico. I pannelli (Fig.1.57) sono più leggeri di quelli convenzionali in composito termoplastico e con aspetto simile alla radica.

***Fig. 3*** *Prodotto in Lignoflex*

I compositi  in fibra naturale sono utilizzati anche per altri componenti. Per esempio, la Fig. 4 mostra un contenitore realizzato con composition a fibra lunga e matrice PP (LFT-PP) che ha rimpiazzato un prodotto realizzato con PP caricato con talco sulla MY Ford Flex CUV del 2009.

***Fig. 4*** *Contenitore realizzato in LFT-PP*

La Fig. 5 mostra i pannelli, destro e sinistro, della console lanciati nel 2010 per la Lincoln MKT CUV, realizzati in LFT-PP. Ad oggi, questi sono le parti più realizzati in classe A per un veicolo di fascia alta.

***Fig. 59*** *Pannelli per console in LFT-PP*

Anche il produttore Giapponense Toyota ha continuato ad investire nelle bioplastiche lanciando nel 2010 sulla Lexus HS250h dei componenti in tessuto non tessuto forniti da Toyota Boshoku e Toray Industries.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, in questo paragrafo si è dimostrato che l'utilizzo di materiali compositi a base di fibre naturali è una realtà consolidata nel settore automobilistico. Questo trend è confermato da progetti come l'autovettura Kestrel, che è mirato a realizzare una autovettura con struttura interamente in composito naturale (Fig. 1.60) o l'uso di tali compositi per macchine ad alte prestazioni come la Lotus Eco Elise (Fig.1.61).

***Fig. 60*** *Kestrel*

***Fig. 7*** *Lotus Eco-Elise*

Gli sviluppi future saranno indirizzati all'ottimizzazione delle prestazioni meccaniche dei compositi a fibra naturale. Molte ricerche, ad esempio, sono focalizzate sullo sviluppo di tessutti ottimizzati come, ad esempio, i tessuti basati su fili ritorti (Fig. 1.62). Questi tessuti innovativi (ie. Biotex e Envirotextile) mirano a superare le limitazioni dei mat attraverso la tessitura di fili continui ben orientati. I miglioramenti in prestazioni meccaniche sono evidenti. Ulteriori miglioramenti sono attesi dagli studi sulla interfaccia tra fibra e matrice e dalla standardizzazione della qualità delle fibre. Tutto questi sviluppi lasciano sperare in un brillante futuro verde e naturale.

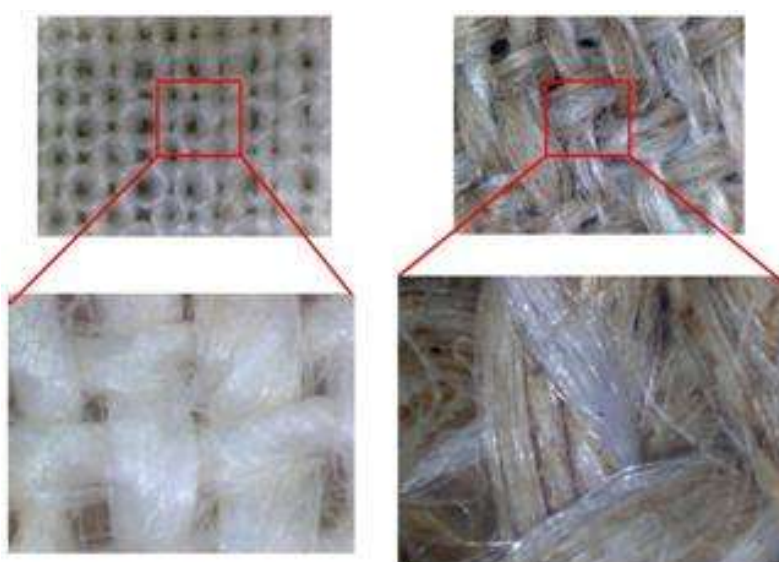



***Fig. 8*** *Immagini di tessuti in fibra naturale: Envirotextile B607 (sinistra); Biotex (destra)*

### 1.4.2 IL SETTORE CIVILE

Negli ultimi trent'anni i materiali compositi fibrorinforzati (*Fiber Reinforced Polymers*: FRP) sono stati impiegati con grande successo nei campi dell'Ingegneria aeronautica, meccanica e navale. Recentemente, le loro notevoli proprietà meccaniche, gli elevati rapporti rigidezza/peso e resistenza/peso, da essi presentati, nonché la considerevole resistenza alla corrosione ne hanno valorizzato l'impiego anche nel settore dell'Ingegneria Civile, in sostituzione e/o integrazione dei materiali tradizionali [74,76,82]. Da alcuni anni, infatti, si assiste ad un crescente uso di tali materiali soprattutto per il ripristino e l'adeguamento strutturale di membrature di conglomerato cementizio armato o di muratura. Più limitato è, invece, il numero di nuove costruzioni civili realizzate interamente con materiale composito, sia in campo nazionale che internazionale. I principali fattori che ne hanno contenuto l’utilizzo sono rappresentati dagli elevati costi del materiale, dal problema dei giunti e delle unioni, dall’assenza di una consolidata modellazione meccanica del loro comportamento strutturale e conseguentemente di normative di riferimento.

Le esperienze finora maturate in campo internazionale hanno riguardano soprattutto la realizzazione di strutture assemblabili, quali ponti e passerelle pedonali, di strutture off-shore e la costruzione di edifici a carattere sperimentale. In particolare, le applicazioni nel settore civile sono consistite soprattutto nell’assemblaggio di profili pultrusi, il cui uso può comportare una riduzione delle masse strutturali fino al 70% rispetto ai materiali tradizionali ed assicurare tempi ridottissimi di montaggio senza richiedere un impiego eccessivo di manodopera e/o di equipaggiamenti pesanti.

I compositi fibrosi non rappresentano un’invenzione recente, bensì le prime applicazioni nel campo delle costruzioni non si sono avute se non dopo gli anni ’80, sia per l’elevato costo, sia per l’alto contenuto tecnologico dei prodotti, i quali richiedevano condizioni d’uso di laboratorio.

Considerando l'elevato standard di prestazioni di materiali compositi in termini di efficacia, durata, manutenzione e costi, l'applicazione dei compositi rinforzati con fibre naturali come materiale da costruzione rappresenta un potenziale enorme ed è fondamentale per raggiungere la sostenibilità. A causa della loro bassa densità e la loro struttura cellulare, la fibra naturale possiede delle buone proprietà di isolamento acustico e delle ottime proprietà di isolamento termico, eliminando uno dei problemi

connessi con l'impiego delle fibre antagoniste come quelle di vetro o di lana di roccia (ad esempio, la manipolazione e lo smaltimento).

I materiali compositi possono essere più resistenti e - specialmente nel caso dei compositi a fibra di carbonio - più rigidi dei materiali da costruzione tradizionali. Conseguentemente, quando per uno specifico progetto, il peso della struttura diventa rilevante, i compositi possono risultare molto attrattivi grazie alla loro minore densità. La resistenza specifica (resistenza/densità) dei compositi può assumere valori fino a quattro volte superiori rispetto a quelli esibiti dai materiali tradizionali; il loro modulo di elasticità normale specifico (modulo/densità) fino al doppio. Ciò significa che, a parità di rigidezza, una struttura di materiale composito può arrivare a pesare circa la metà di un'altra realizzata con un materiale da costruzione tradizionale.

Le primissime applicazioni degli FRP in campo civile si sono registrate in Cina agli inizi degli anni '80. Oggi in questo Paese si possono contare numerosi ponti realizzati con materiali compositi fibrorinforzati, fra i quali i più importanti sono il Miyun Bridge, nei pressi di Beijing, e lo Xiangyong Bridge, recentemente costruito a Chengdu. Dal 1985 ad oggi le cose sono profondamente cambiate e, anche nelle costruzioni, l'impiego degli FRP sta progressivamente diffondendosi divenendo la nuova frontiera dell'attuale tecnologia delle costruzioni.

Il Giappone fu il primo paese a credere decisamente negli FRP e destinò una grande quantità di risorse economiche ed intellettuali in questo settore. L'aver intuito per primi la possibilità di aprire nuovi orizzonti nel campo delle costruzioni ha fatto si che il Giappone possa vantare oggi una posizione di leadership in questo settore.

Negli Stati Uniti la ricerca si è sviluppata leggermente in ritardo, ma grazie alle consistenti esperienze compiute nell'industria spaziale, militare ed aeronautica, ha velocemente recuperato il tempo perduto. Negli USA la maggior parte delle applicazioni è consistita nell'assemblaggio di pannelli di GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) o CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), in genere di tipo cellulare, sovrapposti ed incollati per realizzare sezioni scatolari. Il dipartimento dei trasporti della California determinò reazioni di critica quando, nel 1995, decise di investire milioni di dollari nel rinforzo delle pile delle autostrade dello stato con fasciature in composito fibroso, al fine di migliorarne il comportamento sismico. Oggi tanti stati

stanno finanziando progetti di ogni tipo: dal recupero di ponti, ad edifici, interventi di adeguamento delle strutture sanitarie ed altre applicazioni. In Canada, lo studio in questo settore ha portato allo definizione, poi all'applicazione ed infine al monitoraggio di ponti *steel deck free*, dove cioè l'impalcato è assolutamente privo di strutture in acciaio ed in cui quindi gli FRP vengono usati come profili strutturali.

Non mancano esempi, soprattutto ponti, costituiti da profili pultrusi bullonati o incollati tra loro. I ponti più significativi finora realizzati sono il Tom's Creek Bridge (1996), il Clear Creek Bridge (1996), il Laurel lick Bridge (1997), il Wickwire Run Bridge (1997), il Bentley Creek Bridge (2000) e l'Over Deer Creek (2001).

In Europa le prime strutture di materiale composito sono state realizzate mediante un innovativo sistema costruttivo messo a punto all'inizio degli anni '90 nel Regno Unito e denominato ACCS. Tra di esse le più importanti sono alcuni ponti in Scozia, nel Galles del Nord ed in Inghilterra e precisamente l'Aberfeldy Bridge (1992), il Bonds Mill Lift Bridge (1992), il Bromley South Bridge (1992) e il Parson's Bridge (1995). In particolare, l'Aberfeldy Bridge rappresenta il primo ponte sospeso realizzato completamente con materiale composito: l'impalcato e le colonne sono state messe in opera con il suddetto sistema costruttivo, mentre i tiranti sono di fibra arammidica (*Kevlar*).

Altre significative applicazioni dei materiali compositi nel campo dell'Ingegneria civile hanno riguardato alcuni edifici sperimentali aventi particolari destinazioni. Due esempi importanti sono l'edificio della Compaq Computer Corporation, a Houston in Texas, e l'edificio della Apple Computer, in California. In entrambi i casi la scelta dei materiali compositi è stata motivata dall'esigenza di evitare possibili interferenze tra i campi elettromagnetici interni ed esterni.

Particolarmente interessante è anche l'Eyecatcher Building, realizzato nel 1999 a Basilea con pultrusi di GFRP incollati e bullonati.

Un altro settore in cui stanno trovando largo impiego le strutture di materiale composito è quello delle piattaforme *off-shore*. Per esse la particolare aggressività dell'ambiente circostante rende molto vantaggioso l'uso degli FRP, la cui elevata resistenza alla corrosione consente di ridurre drasticamente i costi di manutenzione. Esempi significativi ne sono la Mars

Tension Leg realizzata dalla Shell Petroli nel Golfo del Messico e la piattaforma costruita a Freeport in Texas per la Dow Chemical.

Nel recente passato, anche in Italia si è avuto il diffondersi di differenti tipologie di applicazioni degli FRP nel settore dell'edilizia, sia a carattere provvisorio che definitivo. Tra le poche esperienze si possono menzionare un ponte pedonale gonfiabile composto da tubi pieghevoli di GFRP, montato a Roma in occasione del Giubileo 2000, e la struttura di copertura del cortile del nuovo Palazzo di Giustizia di Pescara, interamente costituita da profilati pultrusi incollati e/o bullonati.

Un importante e significativo passo in avanti, compiuto nel nostro Paese per la diffusione, in campo civile, di strutture realizzate con materiali compositi fibrorinforzati è rappresentato dalla pubblicazione da parte del CNR di specifiche Linee Guida per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture realizzate con o con la collaborazione di materiali compositi polimerici innovativi (es. CNR-DT 205/2007).

Nelle costruzioni civili il promettente impiego degli FRP oggi copre principalmente tre categorie di funzioni:

1. armatura di materiali tradizionali quali calcestruzzo, muratura e legno;
2. strutture interamente in composito (profili strutturali);
3. rinforzo di elementi strutturali esistenti di varia tipologia e materiale.

Per quanto attiene alla funzione di armatura di materiali tradizionali, bisogna ricordare che uno dei materiali strutturali più diffuso, ossia il calcestruzzo, è soggetto a processi di deterioramento che tendono a disintegrarlo. Diverse sono state le soluzioni tentate, ma un'alternativa radicale per l'eliminazione della corrosione è rappresentata dalle armature non metalliche, in quanto non corrodibili: le armature in FRP. L'assenza del fenomeno della corrosione elettrochimica negli FRP, infatti, ne incoraggia l'utilizzo in tali applicazioni innovative. L'uso di barre d'armatura o di tiranti con questi materiali rappresenta una tecnica tra le più promettenti dell'ingegneria strutturale. Tra le realizzazioni più rilevanti vi sono il ponte di Laurel Lick Bridge installato nel maggio 1997 in West Virginia.

***Fig. 1.63*** *Laurel Lick Bridge, 1997 West Virginia*

Usando barre e tiranti in FRP, i quali a differenza di quelli in acciaio non sono affetti dalla corrosione elettrochimica, molti si aspettano di allungare e migliorare drasticamente la vita delle opere in calcestruzzo. Gli FRP si candidano quindi quale alternativa all'acciaio come materiale d'armatura, anche se, tale candidatura, deve essere ancora suffragata da ricerche che mettano in luce tutti i riflessi strutturali che in tal modo si originano.

Ma gli FRP possono essere impiegati direttamente in strutture interamente in composito, come descritto nella parte iniziale del paragrafo. In questa categoria sono dominanti i profili pultrusi: per essi, leggeri, resistenti e sufficientemente rigidi, si prospettano funzioni tipiche della struttura portante intelaiata. I profilati pultrusi, disponibili in un sagomario del tutto simile a quello per i profili in acciaio, possono essere impiegati in assemblaggi tradizionali o in telai, come travi o colonne.

Gli studi tecnico sperimentali rivolti all'analisi del comportamento strutturale dei profili in materiale composito pultruso sono particolarmente avanzati nei paesi del Nord Europa e negli Stati Uniti. I primi ponti e le prime unità abitative interamente in composito cominciano a fare le loro apparizioni proprio in questi paesi, un esempio è il "Kolding bridge" realizzato in Danimarca.

***Fig. 1.64*** *Kolding bridge, Danimarca*

***Fig. 1.65*** *Esempi di profile pultrusi FRP*

E' stato di recente realizzato a Madrid un innovativo ponte realizzato in composito. La struttura lunga 44 metri e larga 3,5 metri è, secondo il produttore Acciona, la più lunga costruzione portante a struttura unica, senza giunzioni, realizzata con polimeri rinforzati con fibre di carbonio.

***Fig. 1.66*** *Ponte in pultruso realizzato a Madrid dall'azienda Acciona [79]*

Il ponte è il risultato di un progetto co-finanziato dalla Commissione europea finalizzato alla produzione di ponti in composito affidabili e a basso costo per il rapido rinnovo delle infrastrutture.

Progettato per essere il più leggero possibile e per soddisfare, nello stesso tempo, i requisiti di trasporto, della logistica e di installazione, il ponte è stato realizzato con una resina epossidica con durezza elevata, tissotropia chimica e bassa esotermia della Araldite, rinforzata con 12 tonnellate di fibra. Secondo Stefano Primi, del reparto R&D della Acciona, il ponte è stato assemblato sul fiume Manzanares in appena due ore e ha richiesto solo 30 giorni di lavorazione.

La superficie del ponte è più liscia ed esteticamente gradevole rispetto a quella di un ponte in acciaio o cemento e offre un'eccellente resistenza alla corrosione e richiede meno manutenzione. Inoltre non è necessaria la verniciatura.

La società sta inoltre lavorando su un ponte di 200 metri a Cuenca, in Spagna e ha in programma di esplorare ulteriormente l'utilizzo di materiali compositi nel settore civile di tutta Europa, con una prospettiva di più lungo termine per realizzare progetti simili su scala globale.

All’interno del Texas A & M University Health Science Center (USA) si può ammirare un vero e proprio capolavoro nato dalla commistione di architettura ed ingegneria. La scala a chiocciola nella hall è infatti formata da elementi strutturali in cemento armato e preforme in composito rinforzato con fibre, che costituiscono la parte estetica. Il progetto è composto da tre moduli, uno per ogni piano. Il cemento fresco è stato versato nelle forme in composito precurato per permetterne la cura. La forma della scala è tale che il montante superiore potrebbe ospitare un coperchio corrispondente alla superficie del pavimento in alto.

Le preforme in composito sono state realizzate dalla MFG-CP che ha anche progettato una soluzione per poter adattare in loco le preforme a colonne di grandi dimensioni già esistenti. Lo studio di architettura è stato GS & C Group, e l'ingegneria strutturale è stata gestita dalla Structure + Haynes Whaley, entrambe con sede a Austin, TX. Per realizzare le preforme, la MFG-CP ha creato dai disegni tecnici dei modelli delle scale finite in legno e masonite. Questi simulacri sono serviti da modelli 3D per la realizzazione delle preforme in composito le quali hanno poi dato la forma finale alla struttura in cemento. I modelli vengono ricoperti da una speciale

cera per permettere l'estrazione delle preforme; ad inizio laminazione, viene usato un gel-coat carteggiabile per creare la superficie di interfaccia del composito con il cemento. Poi si passa alla laminazione con mat e roving in fibra di vetro impregnati con resina. La struttura in composito deve ovviamente essere abbastanza rigida e resistente per il trasposto e per le successive fasi di colata e cura del cemento.

Per ottenere la rigidezza necessaria, alcune zone del laminato sono rinforzate internamente con un'anima in balsa, ed esternamente con strati di legno. Questi rinforzi vengono co-curati con il laminato per avere un unico blocco monolitico. La resina utilizzata da MFG-CP per le preforme è la Altek® H864, una resina poliestere a basso restringimento della AOC. Il Sales Manager della MFG-CP, Jim Williams, ha sottolineato come le caratteristiche della resina abbiano contribuito al risultato finale, garantendo una ottima impregnazione delle fibre e, nello stesso tempo, un basso contenuto di aria intrappolata (Fonte: AOC Resins)

L'applicazione dei materiali compositi come rinforzo per il ripristino strutturale di strutture già esistenti rappresenta forse nell'ambito delle applicazioni civili il campo dove ormai gli FRP rappresentano a pieno titolo una realtà. Il rinforzo delle infrastrutture deteriorate o danneggiate vanta, infatti, la maggiore numerosità di applicazioni. La domanda di materiali ad alte prestazioni anche in termini di durabilità e l'esigenza di una riduzione dei costi di esecuzione delle riparazioni possono essere validamente coniugate nell'impiego dei materiali FRP.

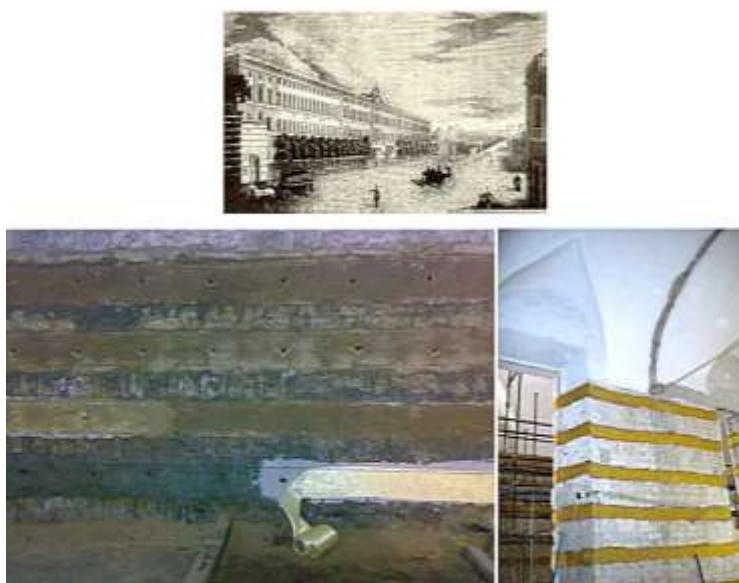



***Fig. 1.67*** *Rinforzo di strutture in muratura presso il Real Albergo dei Poveri a Napoli*

Si tratta di una tecnica molto sofisticata, nonostante l'apparente estrema semplicità e deve essere appoggiata da un attento e scrupoloso studio di progettazione (in Italia sono disponibili le norme CNR). Infatti, l'aggiunta di FRP modifica anche sostanzialmente lo stato tensionale della struttura su cui è applicato, questa modifica deve essere perfettamente recepita e controllata dal progettista.

Nelle zone sismiche il miglioramento del comportamento strutturale delle strutture esistenti si consegue spesso con sorprendente efficacia. Si deve considerare l'alto rapporto resistenza/peso che per le strutture sottoposte ad azioni sismiche risulta determinante. In quest'ambito la tecnologia del wrapping (fasciatura) con compositi formati in sito costituisce una vera rivoluzione dell'ingegneria strutturale.

Infatti, lo sconfinamento delle colonne e il rinforzo flessionali e a taglio delle travi si consegue con facilità ed efficienza "cinturando" o "placcando" gli elementi strutturali con tessuti impregnati di resina.

***Fig. 1.68*** *Rinforzo di strutture in cemento armato*

Nella quasi totalità di applicazioni il rinforzo è esterno, quindi la trasmissione delle azioni dal composito alla struttura originaria avviene sulla pellicola esterna dell'elemento rinforzato.

Per murature storiche il discorso si fa particolarmente interessante. Volte e cupole possono ottenere un aiuto di incalcolabile efficacia se placcate con materiale composito quando sono sottoposte ad azione sismica.

Nell'ambito del rinforzo strutturale storico degli edifici, i consolidamenti strutturali hanno sempre avuto una grande importanza, poiché sono presidi

di sicurezza grazie ai quali la struttura può continuare a vivere espletando le funzioni per cui era stata progettata.

Verso la metà degli anni ottanta in Giappone e in U.S.A. si mettono a punto dei sistemi di rinforzo denominati FRP o "compositi", in cui l'interazione fra una matrice resinosa ed una fibra ad alte prestazioni (come il carbonio) genera un sistema in grado di migliorare le resistenze finali degli elementi trattati se applicato alle strutture. In sintesi, una sorta di tecnica del *beton plaqué* evoluta e migliorata: sottili e leggeri nastri di fibre di carbonio vengono incollati alle strutture mediante impregnazione in situ di resine. Il metodo soppianta l'ingombrante ed onerosa tecnica tradizionale, che prevedeva la messa in opera di pesanti strutture in acciaio mediante connessioni meccaniche e tassellaggi chimici. La tecnica dei rinforzi strutturali FRP (Fiber Reinforced Polymer) si diffonde rapidamente nel mondo dei recuperi delle infrastrutture e delle opere in cemento armato, sia sulla spinta della convenienza economica, sia sull'effettiva efficacia della tecnologia, duramente messa alla prova anche dai potenti sismi Giapponesi e Americani della costa Pacifica alla fine degli anni '90. (fonte: azienda OLYMPUS-FRP)

L'impiego di fibre di carbonio, fibre di vetro, fibre di basalto, fibre di aramide, fibre di lino e canapa, tessuti in fibra di acciaio ed altre con differente modulo per il recupero ed il restauro strutturale di edifici storici, archi, volte, pilastri, strutture in cemento armato, ponti e viadotti sta diventando sempre più di uso generale. Oggi tali rinforzi vengono utilizzati non solo in combinazione con una matrice polimerica, per gli scopi e le applicazioni appena enunciate, ma anche per costituire un tipo di materiale composito completamente differente: il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC, *Fiber Reinforced Concrete*). Esso non ha una matrice polimerica come gli FRP *(Fiber Reinforced Polymer*) ma è un calcestruzzo cementizio additivato con fibre corte di acciaio, di materiale polimerico, di materiale inorganico quale carbonio o vetro, o di materiali naturali, cui possono aggiungersi in opera usuali barre di armatura, lente o pretese. L'aggiunta delle fibre conferisce al calcestruzzo, dopo la fessurazione, una significativa resistenza residua a trazione (tenacità). Quest'ultima dipende da molteplici fattori, tra i quali ad esempio il rapporto di aspetto (ovvero il rapporto lunghezza/diametro equivalente delle fibre), la percentuale volumetrica delle fibre, le caratteristiche fisico-meccaniche di queste ultime.

Le costruzioni realizzate con FRC si sono progressivamente diffuse negli ultimi anni in tutto il mondo, rendendo indispensabile la redazione di Linee Guida o Istruzioni tecniche in grado di orientare e disciplinare l'impiego strutturale di tali materiali.

## 1.5 IMPIEGO DEI MATERIALI COMPOSITI NELLE STRUTTURE SANDWICH

I materiali compositi sono degli eccellenti materiali, in quanto hanno il peculiare vantaggio che possono essere progettati per avere, laddove serve, le proprietà volute, soprattutto in termini meccanici.

Quando una struttura, quindi, il materiale di cui è costituita, è soggetta a considerevoli sforzi derivanti da una sollecitazione a flessione e si ha un limite massimo al peso strutturale, al progettista si apre davanti l'importante opzione di impiego di strutture allegerite e resistenti che prendono il nome di "Strutture sandwich".

Tali strutture sono caratterizzate da una parte centrale detta *core* o *anima*, che distanzia due elementi resistenti superficiali esterni di piccolo spessore dette *pelli* o *facce*, tenuti assieme da un adesivo.

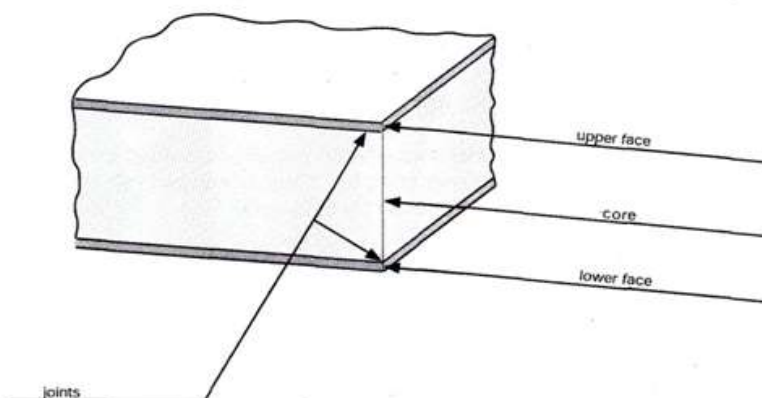



***Fig. 1.69*** *Schema di un pannello sandwich*

Le strutture sandwich sfruttano la possibilità di distanziare, aumentando il momento d'inerzia, due elementi estremamente resistenti (le pelli) così da avere un elevata rigidezza flessionale, mantenendo il peso o riducendolo. Questa evidenza è utilizzata anche in carpenteria metallica con l'impiego, ad esempio, dei profilati IPE, HEA, etc. In questo modo si sfrutta in pieno la resistenza del materiale strutturale, infatti, negli stratificati semplici

(omogenei) sottoposti a flessione, una delle parti esterne è sollecitata a compressione e l'altra a trazione, mentre al centro, nell'asse neutro, la sollecitazione è nulla. Per tale ragione la parte del materiale strutturale prossima all'asse neutro non viene sfruttata al massimo delle sue potenzialità, perché poco sollecitata.

***Fig. 1.70*** *Similitudine tra un pannello sandwich ed una trave a doppia T*

Una trave a sandwich con lo stesse dimensione e peso di una piena, può raggiungere una rigidezza notevolmente superiore per il maggior momento d'inerzia.

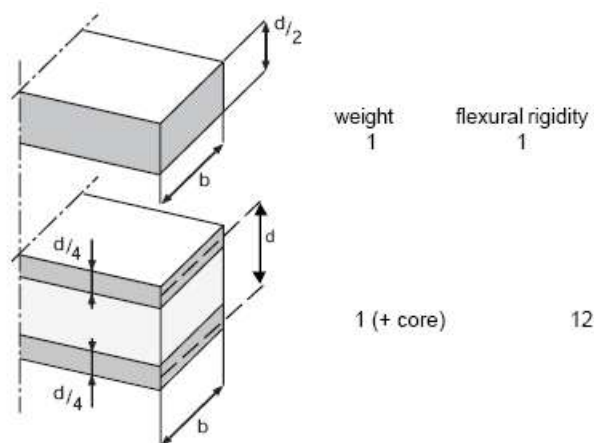



***Fig. 1.71*** *Differenza tra la rigidezza flessionale di una trave piena e una a sandwich*

Un'importante differenza nel confronto tra le due travi è nella capacità di sopportare i carichi trasversali. Per una trave piena i legami sono sufficientemente rigidi da rispettare le ipotesi di Navier, ossia che le sezioni piane rimangono parallele. In una trave a sandwich il materiale del core non è comunemente resistente al taglio e l'ipotesi non è rispettata, quindi di conseguenza, le deformazioni di taglio in molti casi non sono trascurabili.

Diversamente, nelle pelli le deformazioni di taglio possono essere trascurate.

Da quanto appena affermato, si evince come il core svolge varie importanti funzioni: separa le due facce, così da aumentare il momento d'inerzia e quindi la rigidezza flessionale dell'insieme, per questo deve essere sufficientemente rigido per mantenere la distanza costante tra le facce; deve essere anche sufficientemente resistente al taglio, in modo da non fare slittare le facce tra loro, cosi che possano sopportare carichi di compressione e di taglio, e sopportare, come in una trave ad I, quei carichi di taglio che sono causati dalle tensioni perpendicolari al piano del sandwich. Se il core non ha resistenza al taglio, le facce non cooperano ed il sandwich perde la sua rigidezza.

Nella seguente figura si mostra una trave a sandwich ideale e la relativa resistenza al taglio. È evidente come le facce cooperino senza scorrere l'una rispetto all'altra. Nella parte inferiore della figura si vede, in confronto, come in una trave sandwich reale, la rigidezza al taglio è scarsa. In questo caso, le facce non cooperano, lavorando come piani indipendenti l'uno dall'altro.

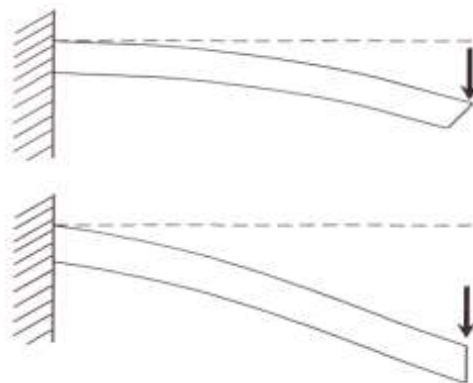



***Fig. 1.71*** *Comportamento di una trave sandwich ideale e di una reale*

Occorre considerare che i pannelli sandwich, nel corso della loro vita, non sono generalmente sottoposti a carichi costanti nel tempo, bensì sono soggetti a sollecitazioni dinamiche variabili. I pannelli sandwich risultano pertanto sottoposti a carichi dinamici durante i quali è estremamente importante conoscere la risposta meccanica e soprattutto, la resistenza alla fatica che è solo una frazione della resistenza statica.

Diversi ricercatori hanno condotto studi sul comportamento dinamico dei materiali utilizzati come core e sulla loro resistenza a fatica, conducendo

test a fatica su pannelli sandwich. Dalle ricerche si evince che una maggiore resistenza a fatica è correlabile ad una maggiore tenacità del materiale d'anima.

La condizione [59] essenziale in una struttura a sandwich è la perfetta aderenza delle pelli all'anima. È sufficiente una piccola zona con scarsa aderenza, che si propaghi con le sollecitazioni, per provocare il cedimento di tutta la struttura. Questo avviene in genere nella parte sollecitata a compressione, dove la pelle, per scarsa aderenza tende ad accartocciarsi.

Nel caso delle giunzioni adesive si possono individuare le seguenti tre tipologie di frattura:

- Frattura coesiva: avviene all'interno di uno dei materiali che costituiscono il giunto. Lo stesso materiale è dunque presente su entrambe le superfici di frattura, le quali possono presentarsi lisce o rugose. È il tipo di frattura che si osserva nelle condizioni ideali di applicazione dell'adesivo.
- Frattura adesiva: avviene all'interfaccia tra l'adesivo e l'aderendo, quando la resistenza dell'interfaccia (forza di adesione) è minore di quella dell'aderendo. Le superfici di frattura sono solitamente lisce e costituite da due materiali differenti. Questo tipo di frattura è indice di una non corretta applicazione dell'adesivo.
- Frattura mista: si presenta alternativamente sia come coesiva che adesiva. Le superfici di frattura sono molto irregolari e sono caratterizzate dalla coesistenza di entrambi i materiali. Si manifesta in presenza di un substrato debole e non consolidato, in concorso con modalità di applicazione dell'adesivo non ottimali.

***Fig. 1.72*** *Tipologie di frattura in un pannello sandwich*

L'efficienza del giunto adesivo dipende da molti aspetti, tra cui il tipo di trattamento superficiale, già richiamato, la composizione chimica e la viscosità dell'adesivo, la tecnica di applicazione ed infine il processo di indurimento o di reticolazione dello stesso adesivo.

I meccanismi di adesione consistono principalmente nell'aggrappaggio meccanico (*interlocking*) dell'adesivo con la superficie dell'aderendo e nella formazione di legami chimici tra le molecole polimeriche e quelle del substrato. Conseguentemente, nel determinare la resistenza dell'adesivo, risultano fondamentali quei trattamenti superficiali tesi ad incrementare la tensione superficiale all'interfaccia ovvero a modificare chimicamente la superficie dell'aderendo, aumentandone la rugosità e quindi l'area effettiva di contatto.

In letteratura sono descritte diverse tipologie di meccanismi di adesione che vengono qui nel seguito riassunti:

- Legame di tipo fisico: coinvolge legami secondari, quali forze di Van der Waals, legami ionici e idrogeno tra le molecole dell'adesivo e dell'aderendo. Per l'interpretazione di tale legame è necessario rifarsi alla teoria dell'attrazione elettrostatica e dell'absorbimento, secondo la quale una buona adesione è innanzitutto garantita se l'adesivo è in grado di bagnare il substrato (*wetting*), cioè è in grado di spandersi sulla superficie solida. A tal fine è necessario che l'energia superficiale dell'aderendo ΓSV (energia specifica riferita all'unità di superficie) sia maggiore di quella dell'adesivo ΓLV: ad esempio le resine epossidiche bagnano molto bene l'acciaio, circostanza che non si verifica per altri materiali, quali ad esempio il polietilene.

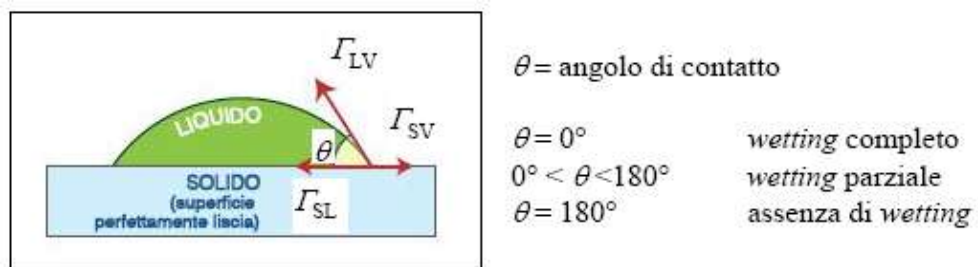



***Fig. 1.73*** *Teoria dell'adsorbimento e angolo di contatto*

- Legame chimico-covalente: coinvolge legami primari (legami covalenti) tra le molecole del substrato e dell'adesivo. La frattura implica quindi la rottura dei suddetti legami. Ciò giustifica, ad esempio, nel caso delle fibre di vetro, l'utilizzo di agenti compatibilizzanti: essi si legano agli ossidi presenti in superficie per

poi reagire con l'adesivo durante la reticolazione ovvero per dare luogo a fenomeni diffusivi (vedere punto successivo).

- Fenomeni diffusivi o interdiffusivi: in seguito alla diffusione o interdiffusione degli atomi o delle molecole attraverso l'interfaccia, si instaura un'unione tra le due superfici. Il meccanismo descritto è peculiare per i compositi a matrice polimerica, in cui la mobilità delle catene rende possibile la formazione di "allacciamenti" (*entanglements*); in tal caso il fattore tempo assume una notevole importanza nei confronti della resistenza finale mobilitata dal giunto.
- Aggrappaggio meccanico (*mechanical interlock theory*): il legame sfrutta la resistenza allo scorrimento reciproco tra superfici localmente compenetrate; da qui l'importanza di avere superfici moltoirregolari su scala microscopica (rugosità) sulle quali l'adesivo possa spandersi, riempire i pori e le fessure presenti e, quindi, solidificare.

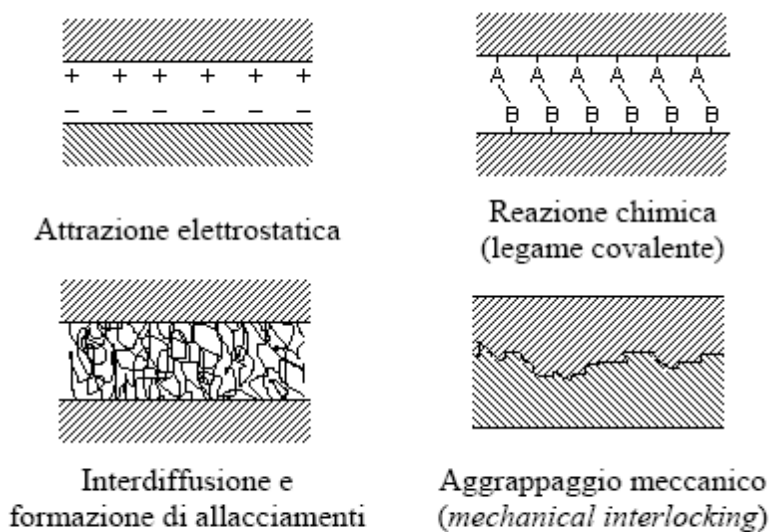



***Fig. 1.74*** *Meccanismi di adesione*

Qualsiasi tipo di trattamento superficiale ha come obiettivo primario la "pulizia" della superficie di applicazione, ossia la rimozione di tutte le eventuali contaminazioni superficiali, quali ossidi, particelle estranee, oli, grassi, polveri, umidità, ecc. Quasi sempre, inoltre, il trattamento posto in essere modifica chimicamente la superficie dell'aderendo favorendo la formazione di legami più forti con l'adesivo, tali da resistere ad agenti ambientali aggressivi, tendenti nel tempo a degradare la resistenza dell'incollaggio. Contestualmente, il trattamento deve inoltre garantire un'adeguata rugosità superficiale.

I trattamenti più semplici che vengono usualmente utilizzati nei placcaggi con compositi fibrorinforzati consistono nella decontaminazione con opportuni solventi e nell'abrasione della superficie mediante sabbiatura. Quest'ultima consente non solo di rimuovere sostanze estranee (ad esempio ossidi) ma anche di assicurare la rugosità superficiale necessaria. In alcune situazioni, prima di stendere l'adesivo, può essere opportuno applicare sul substrato un *primer* con funzione di compatibilizzante. Ovviamente, l'utilizzo di lamine pultruse preformate richiede in aggiunta un'adeguata pulizia della faccia della lamina che verrà poi incollata sul supporto. In alcuni casi le lamine sono protette da una pellicola che mantiene la faccia in questione al riparo da agenti contaminanti esterni. La pellicola va rimossa solo al momento dell'applicazione del rinforzo.

È importante sottolineare che qualsiasi trattamento superficiale deve essere necessariamente eseguito subito prima dell'applicazione del rinforzo onde evitare il pericolo di ricontaminazione.

Tra gli agenti contaminanti, in aggiunta a tutte le possibili sostanze estranee presenti in cantiere, va tenuto in conto l'umidità: è infatti buona norma assicurare che le superfici di incollaggio siano ben asciutte prima dell'applicazione dell'adesivo.

In sintesi gli adesivi devono avere soprattutto una ottima resistenza a taglio, per garantire un idoneo trasferimento degli sforzi tra gli strati, ma anche una buona resistenza agli sforzi di trazione. La regola base è che comunque gli adesivi devono avere una resistenza pari superiore a quella del core. Inoltre, devono avere possedere buona bagnabilità per aumentare la superficie di contatto. Altre proprietà auspicabili negli adesivi sono una buona tenacità, elevata resistenza al peeling, buona tolleranza alle temperature elevate, alta $T_g$, buona stabilità geometrica, preparazione preventiva delle superfici non troppo laboriosa e possibilmente curing a temperatura ambiente.

Gli adesivi strutturali termoindurenti sono tra i più diffusi e forniscono una buona resistenza al creep, ai solventi ed alle temperature elevate. Tra queste, le resine epossidiche hanno le migliori proprietà meccaniche. A scapito della temperatura massima di servizio, si possono tenacizzare formando copolimeri con elastomeri. Altri composti con prestazioni inferiori, ma diffusi sono basati su resine poliuretaniche, fenoliche ed acriliche. In definitiva, esiste una grande varietà di adesivi adatti ai casi specifici.

Data l'elevata potenzialità dell'impiego dei sandwich, nel corso dei decenni sono state studiate diverse tipologie di strutture d'anima per ovviare alle problematiche precedentemente esposte.

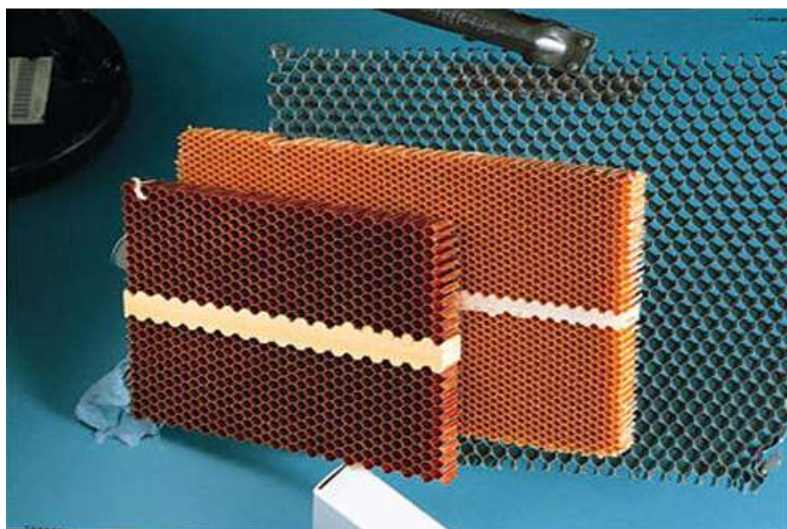



***Fig. 1.75*** *Un core a nido d'ape in metallo e uno in materiale polimerico*

La struttura a nido d'ape presenta un area di incollaggio effettiva molto esigua, dato il sottile spessore delle pareti delle celle. In compenso, le resine, per effetto della capillarità hanno la tendenza a bagnare una piccola quota della parete della cella, aumentando la superficie di aggancio. Il nido d'ape in polipropilene viene fornito con le due facce già ricoperte da un tessuto non tessuto termosaldato. Questo serve ad assicurare l'aderenza delle pelli al polipropilene che altrimenti sarebbe scarsa. Con questo tipo si eseguono in genere pannelli con le pelli prefabbricate in vetroresina che successivamente vengono incollate; l'adesivo, a base di resina, impregna il nontessuto che determina l'aderenza. In genere il nido d'ape in polipropilene viene impiegato nella costruzione di pannelli in edilizia. In tutti gli altri settori, specialmente in quello nautico, si utilizzano anime in materiale espanso. La costruzione del sandwich risulta più. Si possono, infatti, stratificare le pelli direttamente sul pannello di espanso; se si dispone di un impianto per il vuoto, si può completare la stampata del sandwich in una sola operazione. L'adesione delle pelli sulla superficie dell'espanso è ottima, grazie agli alveoli, che presentano uno sviluppo di superficie effettiva, maggiore dell'area del pannello.

I materiali espansi utilizzati come anima sono polimeri, il più diffuso è il PVC espanso. Sono degli espansi rigidi a cellula chiusa forniti in lastre,

disponibili in diversi spessori e densità. Un altro interessante materiale è la polimetacrilimmide (PMI), più costoso, ma con maggior resistenza alla compressione a parità di densità. É un materiale molto rigido, poco adattabile alle superfici curve. Questi materiali resistono bene ai solventi, quindi possono essere stratificati anche con le resine poliesteri e le vinilesteri. I produttori principali di schiuma PVC sono la DIAB e l'Airex/Herex detentori della formula che fu sviluppata dal dott. Lindermann .

***Fig. 1.76*** *Core in schiuma poliestere*

Si definiscono schiume quei materiali cellulari ottenuti mediante la dispersione di un gas in un materiale plastico solido. La schiuma può essere:

- a celle aperte, se la fase gassosa è continua.
- a celle chiuse, se la fase gassosa non è interconnessa.
- flessibile, semi-rigida o rigida.
- di materiale termoplastico o termoindurente.

La schiuma può essere creata direttamente nello stampo, se viene immessa a pressione allo stato liquido unitamente al gas, oppure già in blocchi solidi semilavorati, che vengono opportunamente tagliati e lavorati. Le schiume sono facilmente lavorabili e hanno basso costo e per questo sono solitamente usate per costruire pannelli sandwich, nonostante le loro caratteristiche meccaniche siano inferiori a quelle del nido d'ape. Presentano ottime caratteristiche di isolamento termico e acustico, ottima capacità di smorzamento delle vibrazioni e resistenza agli urti.

Altri tipi di core sono i corrugati o Structural core sandwich, dove dei laminati, spesso dello stesso tipo delle pelli, sono usati per distanziare e collegare le pelli, come nella seguente figura od anche per rinforzare le schiume dell'anima. Quando la corrugazione è in una direzione particolare

hanno comportamento ortotropo. Un esempio sono i cartoni per l'imballaggio che vengono utilizzati come elementi ad elevato assorbimento di energia d'urto, ma per questo uso, per prevenire la delaminazione, i laminati interni devono vincolare le facce attivando i modi di rottura fragile.

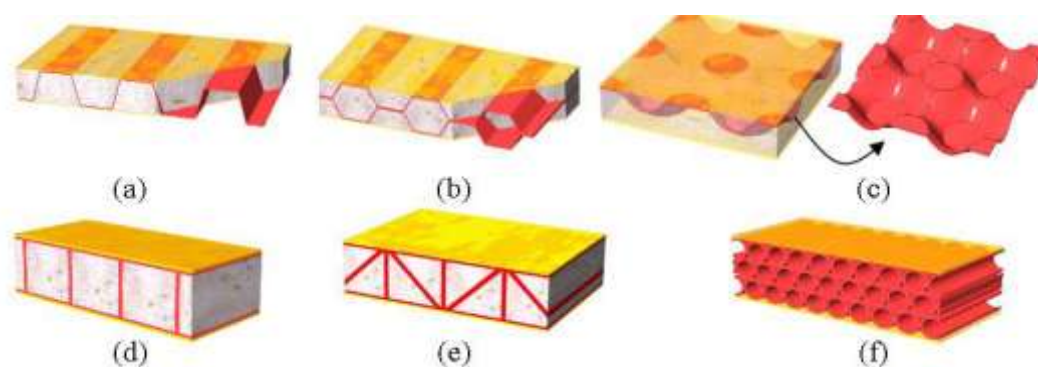



***Fig. 1.77*** *Alcuni tipi di core material*

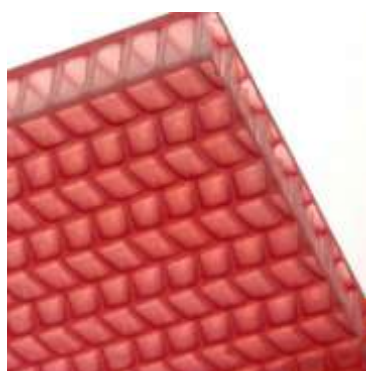



***Fig. 1.78*** *core a nido d'ape in polimero termoindurente*

Anche il legno di balsa viene impiegato come anima. Il core di legno di balsa ha una densità compresa tra i 90 e i 160 kg/m$^3$, più elevata rispetto alla media degli espansi, però consente di ottenere manufatti estremamente resistenti, grazie all'ottimo connubio con le resine, che riescono a penetrare nella capillarità del legno, creando un eccellente legame tra le pelli e la struttura dell'anima.

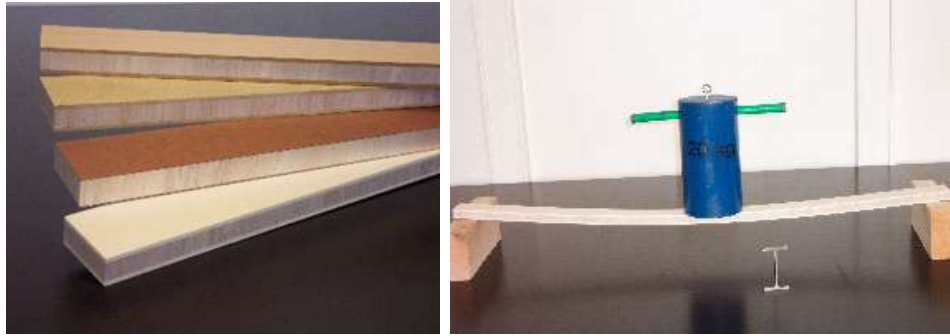



***Fig. 1.79*** *core realizzato in legno di balsa*

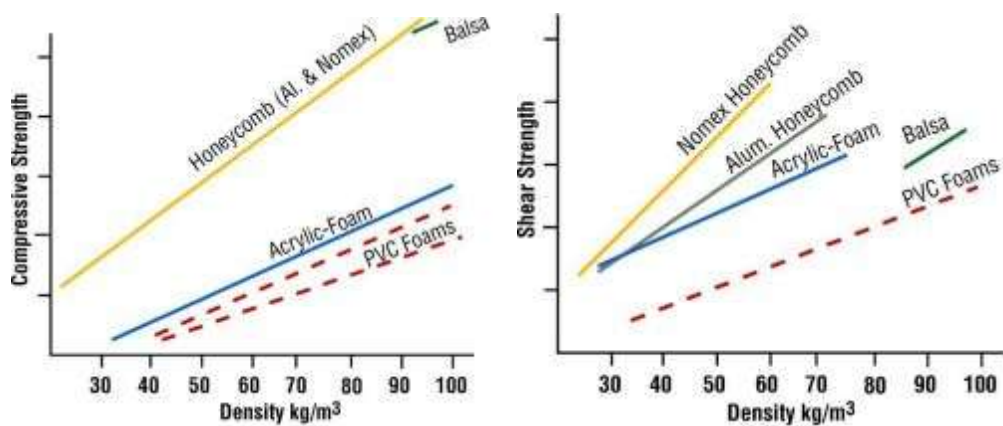



***Fig. 1.80*** *confronto tra le proprietà meccaniche di alcuni materiali d'anima*

Il PVC espanso, come anche la balsa, vengono forniti in pannelli rigidi o se lo consentono, con curvature ad ampio raggio. Per le forme più complesse o curvature di piccolo raggio, è disponibile il tipo quadrettato screen colth. Si tratta dello stesso materiale rigido, però tagliato in piccoli quadrati di 3 cm, di lato, incollati su una garza in tessuto di vetro che ha lo scopo di tenerli uniti. In questo modo il pannello risulta perfettamente adattabile a qualsiasi superficie.

In alternativa al tipo quadrettato, esistono degli espansi cosiddetti duttili, che possono essere curvati o addirittura piegati ad angolo retto senza rompersi, questi sono anche termoformabili: si possono preformare con un fohn industriale e mantengono la forma acquisita. Fino a spessori di 10 mm questi possono essere arrotolati senza problemi, quindi molto comodi per le spedizioni, hanno però un costo più elevato rispetto ai tipi rigidi.

***Fig. 1.81*** *Intagli per realizzare una superficie curva*

Un altro tipo di profilo è noto semplicemente come “tagliato“ (cut) (doppio taglio, triplo taglio etc.). La schiuma è ancora tagliata in quadrati da 3 cm ma solo per due terzi dello spessore. Questo consente alla lastra di avere una certa flessibilità, ma l'intaglio è utilizzato principalmente come via di scorrimento della resina nei processi di infusione, o come via di fuga per l'aria, quando si utilizza la laminazione manuale.

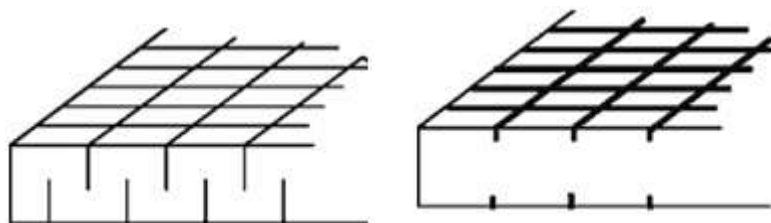



***Fig. 1.81*** *Tipi di intaglio su materiale d'anima preformato*

Alcuni produttori realizzano anche lastre scanalate. Queste scanalature misurano normalmente 3 mm sia in spessore che in profondità e sono utilizzate come canali di scorrimento nella realizzazione di pelli relativamente sottili con il sistema sottovuoto. Altri tipi di lavorazione disponibili presso i distributori includono la perforazione e l'incisione. Entrambi vengono utilizzati nei processi di infusione di resina o come vie di fuga per l'aria.

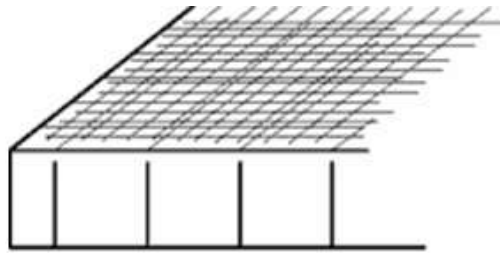



***Fig. 1.82*** *Esempio di lastra scanalata*

Recentemente sono stati condotti importanti studi sulle strutture a nido d'ape: sono stati introdotti i materiali auxetici, la cui peculiarità sta nel possedere coefficiente di Poisson positivo. Tra questi si presenta come soluzione innovativa una particolare struttura denominata *Chismatech*, studiata dal gruppo di ricerca in cui il candidato ha condotto le attività di ricerca.

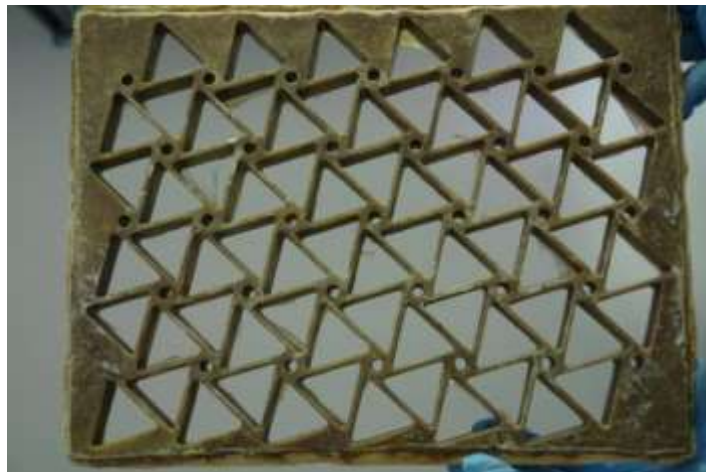



***Fig. 1.83*** *Pannello d'anima auxetico "Chismatech"*

La possibilità di utilizzare materiali sandwich comporta vantaggi dal punto di vista meccanico e della leggerezza strutturale, ma determina anche una notevole libertà nel design, consentendo a disegnatori ed ingegneri estrema libertà in termini di forma e funzionalità.

Se, inoltre, le pelli esterne del sandwich sono costituite da materiali compositi a matrice polimerica i vantaggi sono incrementati, in quanto, i rinforzi che costituiscono le pelli possono essere orientati in modo da essere allineati con la distribuzione del carico. In questo modo le prestazioni strutturali sono sviluppabili al massimo.

Ulteriori vantaggi, nell'impiego della struttura a sandwich consiste nel fatto che la riduzione di peso strutturale, dovuto all'impiego di un materiale d'anima a bassa densità, comporta anche un miglior isolamento termo-acustico, proprietà non trascurabile quando gli elementi progettati avranno la funzione di creare un idoneo isolamento da condizioni esterne non accettabili (elementi di tamponamento esterno in edifici prefabbricati, cabina passeggerri degli aeromobili civili, imbarcazioni nautiche, etc.)

La riduzione del peso nel settore dei trasporti, oltre ad essere necessaria in alcune applicazioni (aeronautica e nautica), comporta minori consumi energetici, con conseguente miglioramento dell'impatto ambientale,ma anche maggiore velocità, aumento delle distanze percorribili, riduzione dei consumi, maggiori capacità di carico.

In ultima analisi, i materiali sandwich hanno, inoltre, un ottimo comportamento agli urti, grazie al materiale d'anima che agisce assorbendo gran parte dell'energia d'impatto, preservando le pelli e limitando, quindi, i danni alla struttura. Alcune evidenze sperimentali dimostrano chiaramente come le navi costruite con tecnologia sandwich abbiano registrato danni minimi a seguito di impatti con moli o banchine. In condizioni analoghe un'imbarcazione costruita con laminati a pelle singola avrebbe subìto danni tali da dover ricorrere a significative opere di riparazione.

## 1.5.1 PRODUZIONE

I metodi di produzione delle strutture sandwich, con pelli esterne in materiale composito polimerico, si possono dividere in due classi: il *co-curing* ed il *secondary bonding*.

Nella prima il sandwich viene assemblato a secco, frapponendo tra le due preforme in tessuto il materiale d'anima, dentro uno stampo e poi chiuso da un controstampo rigido o da un sacco per il vuoto. In una seconda fase si inietta la resina mediante uno dei processi descritti per i soli compositi (Bag Molding, RTM, VARTM, etc.). In tal caso l'adesivo è costituito dalla resina dello stesso laminato e ciò offre il vantaggio di poter realizzare forme geometricamente complesse, riducendo al minimo il numero delle parti e quindi la necessità di giunzioni.

E' anche possibile utilizzare tecniche produttive meno automatizzate, ossia fare ricorso alla laminazione manuale o mediante spray, laminando in due step successivi le pelli sul core.

Nella seconda tecnica, pelli e anima sono realizzati separatamente e solo in una seconda fase verranno incollati, previa sagomatura dei singoli elementi.

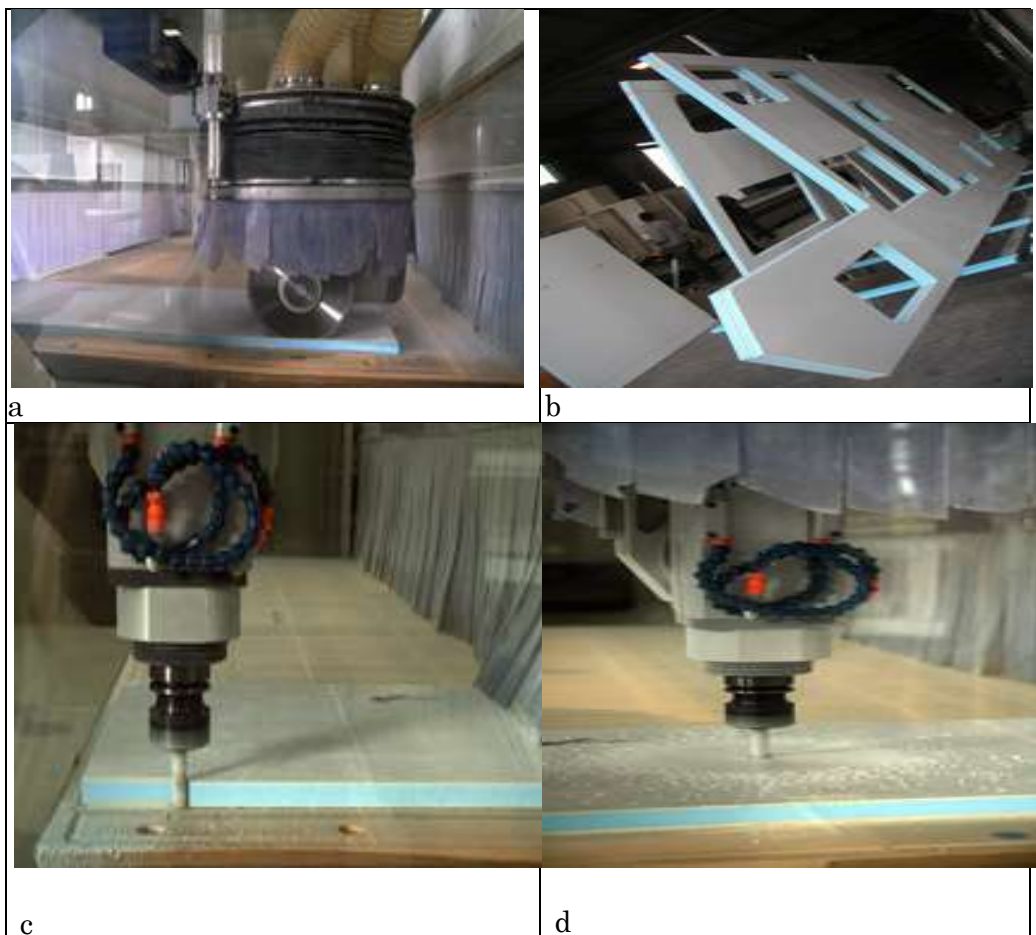



***Fig. 1.84*** *Esempi di lavorazione operate du un sandwcih*

### 1.5.2 APPLICAZIONI INDUSTRIALI

Il primo uso intensivo dei pannelli a sandwich fu durante la II guerra mondiale. La struttura degli aerei Mosquito, per la carenza di altri materiali in Inghilterra durante la guerra, era realizzata con un compensato speciale prodotto tramite una combinazione resistente di fogli di legno di balsa ecuadoriana e fogli di compensato ottenuto da legno di betulla canadese, tenuti saldamente insieme da una particolare colla per legno, inizialmente a base di caseina e poi modificata con l'introduzione di formaldeide, ritenuta più resistente ai climi tropicali nei quali il Mosquito venne poi impiegato [80].

***Fig. 1.85*** *Mosquito*

Sempre durante la II guerra mondiale furono fatti i primi studi sui sandwich. Negli anni '50 gli studi si concentrarono sui materiali a nido d'ape di tipo metallico che furono usati principalmente nell'industria aeronautica. Tuttavia, presentavano vari limiti, ad esempio avevano grossi problemi di corrosione.

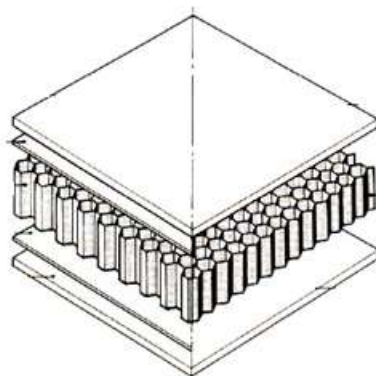



***Fig. 1.86*** *Schema di sandwich con nido d'ape*

Dalla fine degli anni ‘50 furono prodotte savriate *cellular plastics*, ovvero, plastiche alveolari, adatte come materiali da core. Agli inizi furono usati materiali piuttosto morbidi per le loro  proprietà isolanti, per esempio il polistirene o il poliuretano. In seguito fu possibile produrre delle plastiche nidificate più dure, con densità più elevata, e da quel momento diventarono utilissimi ed adattabili ad ogni idea. Oggi esistono una vastissima varietà di plastiche nidificate con diverse qualità.

La prima schiuma polimerica utilizzata per produrre plastiche alveolari, formulata specificamente per l’ambiente marino, è stata una miscela di polyvinyl chloride (PVC), e isocianato, (chiamata semplicemente schiuma PVC), formula che fu creata in Germania dal dott. Lindermann tra gli anni ‘30 e ‘40 e ceduta dalla Germania come indennizzo ai danni di guerra.

La tecnologia del sandwich è oggi ampliamente utilizzata nella nautica, nel settore trasporti, nel settore dell’energia eolica e nelle applicazioni industriali aerospaziale da aziende che vogliono ottenere soluzioni tecniche e produttive con elevate resistenze strutturali e pesi estremamente limitati.

Imbarcazioni da competizione

Superyachts

Pattugliatori

Barche per uso militare

Battelli da diporto

Imbarcazioni di soccorso

***Fig. 1.87*** *Alcune applicazioni nel settore nautico*

La costruzione di sandwich per scafi, ponti, e sovrastrutture, é il metodo più diffuso nell'industria nautica, sia per le imbarcazioni da diporto, che per quelle commerciali o militari.

Tutte le imbarcazioni presenti all'ultima edizione della regata "Volvo Ocean Race" (probabilmente la piú dura/impegnativa nel suo genere), sono caratterizzate da scafi interamente costruiti utilizzando materiali d'anima per sandwich.

Le navi da salvataggio, progettate per la navigazione in condizioni estreme, sono anch'esse caratterizzate da scafi con fondo in materiali sandwich specifici per resistere allo slittamento del carico, situazione che costituisce la norma.

Il leader mondiale nella produzione di navi da combattimento, utilizza ormai da decadi i composti sandwich al fine di ottenere imbarcazioni in grado di resistere all'esplosione di mine, e contemporaneamente raggiungere alte velocità. La corvetta *Visby* di Kockumus (la piú grande imbarcazione al mondo costruita utilizzando la tecnologia sandwich), e la motovedetta veloce *Skjold*, sono state prodotte entrambe utilizzando i compositi sandwich ed il metodo di infusione.

Treni

Camion

***Fig.1.88*** *Esempi di applicazioni nei trasporti terrestri*

Pale per macchine eoliche

Cabine

Spinners

***Fig. 1.89*** *Esempi di applicazioni nell'eolico*

***Fig. 1.90*** *Esempi di applicazioni nei mezzi aerei*

***Fig. 1.91*** *Esempi di applicazioni in altri settori*

Nel settore aerospaziale occorre ricordare il vettore – Ariane 5 – Struttura ACY 5400 che è stato progettato, mediante software ESA Comp, e costruito dalla Contraves Space AG, Svizzera, avente elevati carichi di compressione, elevata rigidezza, bassa densità. La struttura è costituita da

sandwich con fibre di carbonio unidirezionali nelle pelli e core in honeycomb di alluminio. Lo sviluppo è cominciato nel 1999 ed il primo volo è avvenuto nel 2000, dopo 17 mesi.

***Fig. 1.92*** *Vettore Ariane 5*

Negli ultimi anni si è assistito a un crescente interesse del settore edile per i materiali compositi rinforzati con fibre sintetiche (vetro), ma soprattutto naturali di origine vegetale, grazie alle loro elevate proprietà specifiche unite alla semplicità di messa in opera, alla facile manutenibilità, alle eccellenti proprietà dielettriche, all'inattaccabilità da parte di aggressivi chimici. Nella fattispecie le strutture in composito preferite nell'edilizia sono quelle di tipo "sandwich", che permettono di accoppiare elevata resistenza a rigidità flessionale a un eccellente potere di isolamento termoacustico, con pesi notevolmente più bassi rispetto a quelli di analoghe strutture monolitiche.

In edilizia, i pannelli sandwich vengono utilizzati come elementi verticali di chiusura, di partizione interna e di chiusura orizzontali di copertura o di calpestio. Il loro impiego è generalmente riservato all'edilizia perfabbricata residenziale e industriale.

Esistono in commercio numerose aziende che realizzano pannelli sandwich ad elevate prestazioni termo-acustico-meccaniche. A titolo di esempio si riporta uno dei pannelli prodotti dall'azienda italiana Alubel, costituito da due pelli esterne in laminato e un'anima in poliuretano espanso.

Ovviamente tali pannelli coibentati sono strutture prefabbricate prodotte per essere montate modularmente e presentano quindi particolari cerniere di giunzione che grazie a vari sistemi di fissaggio preservano la struttura da qualsiasi tipo di infiltrazione nel tempo.

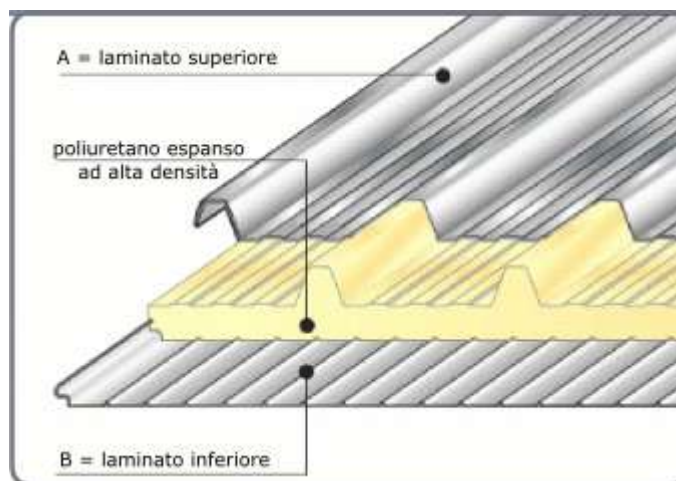



***Fig. 1.93*** *Pennelli sandwich Alubel*

Uno delle applicazioni più interessanti che riguarda l'impiego di pannelli sandwich in edilizia, costituiti da pelli in materiale composito, è lo Stedelijk Museum ad Amsterdam, in Olanda. Una gran parte dei pannelli sono già stati montati su quella che sarà poi conosciuta come "La Vasca". La costruzione bianca e dalla forma galleggiante, con la sua linea snella, elegante e sobria, sarà la controparte dell' adiacente edificio storico in mattoni nel 1895. Il produttore giapponese Teijin ha prodotta e donato le fibre Twaron (fibra aramidica) e Tenax (fibra di carbonio) per creare la facciata diventando uno dei principali fondatori del nuovo Museo Stedelijk.

La facciata, progettata dagli architetti Benthem-Crouwel, è costituito da una singola superficie liscia e brillante che si estende per circa 3000 metri quadrati. Con questa scelta è fondamentale ridurre al minimo l'espansione termica del materiale è la soluzione è stata trovata nelle fibre Twaron e Tenax.

L'analisi, effettuata dalla società di ingegneria Solico, ha dimostrato che la soluzione è una struttura di tipo sandwich con skin interni ed esterni rinforzati con fibre Twaron e Tenax. Infatti nel laminato la dilatazione termica della resina è contrastata dai coefficienti di dilatazione termica negativi delle fibre. Il risultato è un pannello composito con elevata stabilità dimensionale; le dilatazioni raggiungono 1 mm su 100 metri per ogni grado

Celsius. Con un composito in fibra di vetro o con l'alluminio si otterrebbero deformazioni due volte e mezzo più elevate.

I Pannelli sono stati prodotti con le fibre Teijin dalla Holland Composites utilizzando resina poliestere ed un riempitivo in schiuma PIR.

In tutto, la facciata è composto di 271 elementi contenenti 4850 kg di Twaron e 4050 kg di Tenax. I pannelli sono montati in loco e incollati tra loro con un laminato di collegamento in modo da dare continuità di forma ed estetica alla facciata [81].

***Fig. 1.94*** *La costruenda facciata del museo Stedelijk Museum ad Amsterdam*

# I PROCESSI DI PRODUZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI

I processi di produzione che interessano i materiali compositi sono numerosi e, sebbene molti ricadono all'interno della stessa categoria, presentano varianti anche significative al principio di base che dà il nome al processo [1, 2, 3, 4].

## 2.1 I PROCESSI A STAMPO APERTO

### 2.1.1 HAND LAY-UP

L'*hand lay up o laminazione manuale* è un metodo *artigianale***,** il più vecchio e semplice per costruire pezzi in materiale plastico rinforzato ed è ancora largamente usato poiché fa uso di dispositivi semplici ed economici e di manodopera anche non qualificata. Il grande vantaggio di questa tecnica è la possibilità di realizzare pezzi di grandi dimensioni, infatti si usa per le imbarcazioni in vetroresina e nella componentistica in generale, ma ha lo svantaggio di permettere bassi livelli produttivi e il contatto degli operatori con i materiali impiegati.

La tecnica consiste nell'applicare resina e fibre su uno stampo per un primo strato seguito dalla rimozione di bolle d'aria tramite rulli. Altri strati di resina e fibre vengono di seguito aggiunti sino ad arrivare allo spessore di progetto. Dopo l'ultimo strato si può applicare un ulteriore strato di resina per migliorare la finitura superficiale.

Il pezzo finito avrà la forma dello stampo in cui è avvenuta la laminazione, le cui superfici devono essere perfettamente pulite poiché la finitura superficiale dello stampo condiziona l'aspetto del pezzo. Inoltre, lo stampo subisce una operazione preliminare nella quale viene ricoperto di un agente distaccante chiamato gel-coat che costituisce, alla fine del processo, la superficie esterna del pezzo. Tale agente viene applicato con

rullo o tramite pistola; occorre attendere la gelificazione prima di procedere alla stratificazione. Sopra l'agente distaccante, viene steso uno strato di resina tramite rullo.

Lo stampo può essere maschio o femmina a seconda della superficie più importante; se la superficie esterna è critica viene usata la cavità altrimenti viene usato lo stampo maschio.

Tralasciando la realizzazione degli stampi che dipendono in questo caso dall'economicità e dalle caratteristiche del pezzo da realizzare, i distaccanti sono di materiali quali cere, resine, fogli di materiale plastico, PTFE, che vengono impiegati per consentire l'estrazione dagli stampi. Le cere si utilizzano quando la temperatura del processo non supera i 60°C, si passano manualmente ogni volta che si opera. Un metodo invece che è semi permanente è quello delle resine che si fondono con lo stampo durante la reticolazione, data la loro tensione superficiale bassa, e possono essere anche spruzzati. I fogli di materiale plastico non alterano le superfici del prodotto finito, e si depositano allo stesso modo delle fibre. Aumentando il costo ulteriormente, si usa il PTFE per applicazioni ad alta temperatura (200°C). In questa tecnica si va per strati infatti dopo il primo di distaccante si stende il gel-coat, una particolare miscela di resina, ed altri componenti, atta a dare la colorazione, e la finitura superficiale voluta, e perciò è molto importante l'attenzione con cui si esegue questa operazione, per evitare bolle, screpolature, e difetti superficiali. Poi si dispone un primo strato di fibra, che può essere mat, tessuto o stuoia, già tagliata alle dimensioni opportune, e si applica la resina sulle fibre, con l'aiuto di pennelli dopo averla mescolata attentamente con il catalizzatore, poi si esegue la rimozione di bolle d'aria tramite la rullatura.

I pezzi vengono estratti dopo polimerizzazione, in genere a temperatura ambiente, ma in alcuni casi, si fa uso di un moderato flusso di calore per accelerare il processo di produzione, scollandoli dallo stampo con sforzi successivi esercitati lungo il bordo o mediante l'insufflaggio di aria compressa. Altra operazione di finitura consiste nel tagliare lo stratificato che deborda dallo stampo, una volta che il pezzo è gelificato.

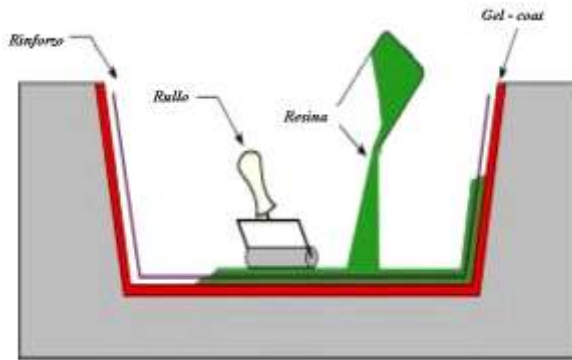



***Fig. 2.1*** *Schematizzazione della tecnica della laminazione manuale*

## 2.1.2 SPRAY LAY-UP

É una evoluzione del Hand Lay Up in cui il rinforzo viene deposto necessariamente in forma di fibre corte, mediante un sistema a lama rotante azionato ad aria compressa, detto pistola, con cui vengono tagliati i filamenti continui di fibre, tratti direttamente da bobine. Questa tecnica consente di diminuire i tempi di applicazione e di impregnazione del rinforzo, di eliminare gli sfridi di fibra e resina.

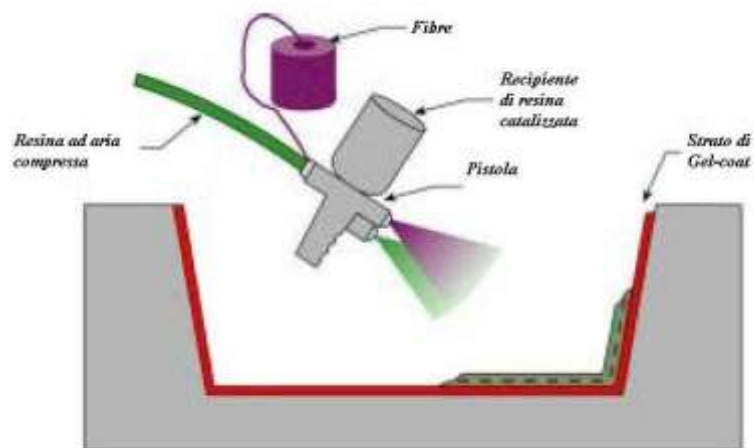



***Fig. 2.2*** *Schematizzazione del processo di spray lay-up*

Per compattare le fibre nella resina ed eliminare l'aria intrappolata nel composito si usano dei rulli compattatori. Come nel caso del lay-up manuale una delle operazioni critiche consiste nell'applicazione corretta del distaccante e del gel-coat sullo stampo.

Per potere adottare tale processo è necessario impiegare resine a bassa viscosità per garantire un corretto spruzzo e la bagnabilità delle fibre. Come per l'hand lay-up di solito si usa la polimerizzazione a temperatura

ambiente, ma in alcuni casi, si fa uso di un moderato flusso di calore per accelerare il processo di produzione. Tale tecnologia si presta ad essere automatizzata con facilità, contenendo i costi ed assicurando maggiore affidabilità nella realizzazione del processo, ma non è possibile orientare le fibre, e quindi limitata alla realizzazione di laminati isotropi nel piano.

## 2. 2 FILAMENT WINDING

Quando l'oggetto da realizzare ha la forma esterna di una superficie di rivoluzione e per lo più con simmetria cilindrica, si può realizzare mediante l'avvolgimento di fili o nastri impregnati su di un mandrino che successivamente, a consolidamento avvenuto, verrà estratto. Si tratta di un processo, nato oltre trenta anni fa, che permette di realizzare elevati standard qualitativi in termini di prestazioni meccaniche e di riproducibilità.

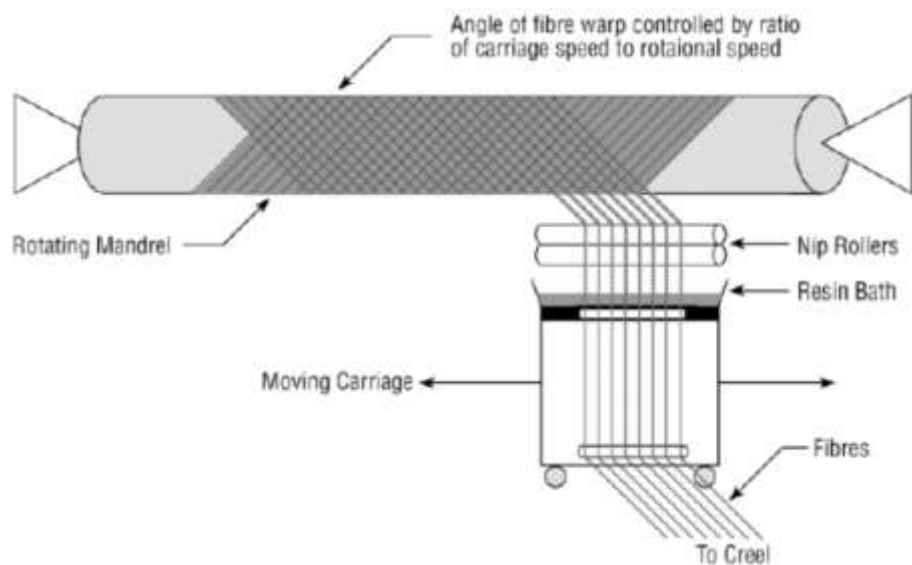



***Fig. 2.3*** *Schematizzazione del processo di filament winding*

Grazie all'avvento dei microprocessori è stato possibile automatizzare e controllare passo per passo l'andamento dell'intero processo, in modo tale da avere un incremento della produzione e conseguire una migliore qualità del prodotto finito.

Si distinguono due tipi di processo a seconda di come vengono impregnate le fibre ovvero: avvolgimento per via umida ed avvolgimento di preimpregnati.

L'avvolgimento per via umida è il tipo più diffuso e consiste nell'impregnare delle fibre di tipo roving per poi avvolgerle sul mandrino. L'impregnazione avviene trascinando le fibre in un bagno di resina, per poi farle passare per un percorso tortuoso, tra dei rulli, e poi per un pettine per eliminare la resina in eccesso e per evitare che le fibre si sovrappongano. Se le dimensioni sono piccole, o comunque il numero delle bobine è piccolo, allora la vasca, il pettine, ed i rulli, si muovono in un sol pezzo con carrello porta fibre, altrimenti le fibre roving vengono tirate, da una cantra fissa, con una leggera trazione. Per questo tipo di impregnazione, per prevenire la formazione di bolle durante l'avvolgimento, si usano dei termoindurenti con basso contenuto di sostanze volatili, e per garantire una buona impregnazione la viscosità della resina, alla temperatura di processo,deve essere bassa.

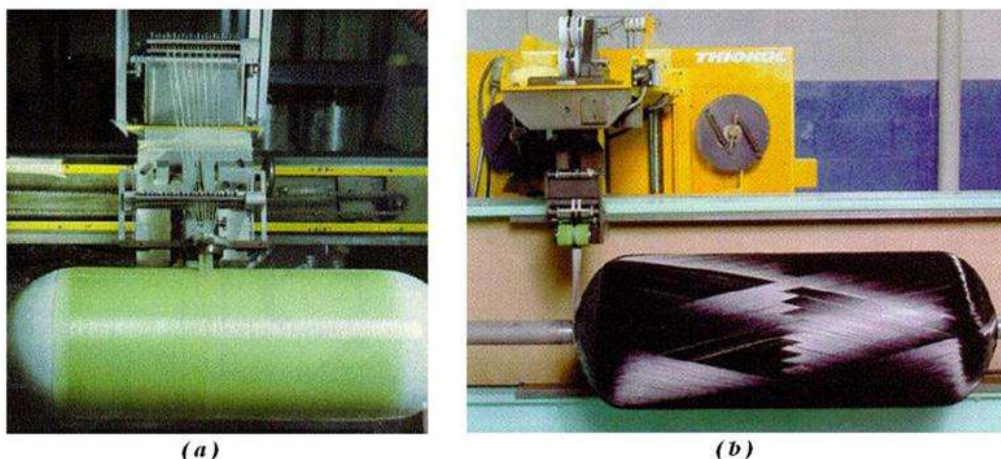



***Fig.2.4*** *Diverse tecniche di avvolgimento: (a) Wet Winding avvolgimento per via umida ; (b) Dry Winding avvolgimento con preimpregnati*

Uno dei parametri principali di processo è la velocità di passaggio delle fibre dalla vasca che deve essere tale da non portare con se, dentro la resina, aria, creando un'emulsione con piccole bolle che verrebbero trascinate, a loro volta, con la fibra sul pezzo finito, sul quale durante la formatura, e la reticolazione, potrebbero, avendo tempo a sufficienza, coalizzarsi in bolle tali da costituire degli intagli o cricche di innesco per rotture in esercizio. Alla porosità si rimedia con il ricircolo della resina o realizzando un leggero grado di vuoto aspirando l'aria.

Nell'avvolgimento con preimpregnati viene a mancare la fase di impregnazione, visto che le fibre sono già impregnate e tenute in uno stato

di pre-polimerizzazione, mediante il mantenimento a basse temperature o in assenza di raggi ultravioletti. In questo modo si ottiene un miglioramento netto riguardo la formazione di bolle.

Un parametro fondamentale che differenzia gli avvolgimenti è l'angolo d'avvolgimento, ossia quello compreso tra la direzione dei filamenti e la tangente al meridiano del mandrino. Sotto questo aspetto distinguiamo vari tipi di avvolgimenti:

- Circonferenziali, con angoli di circa 90°;
- Elicoidali, con angoli compresi tra 20° e 85°;
- Polari, con angoli compresi tra 0° e 20°.

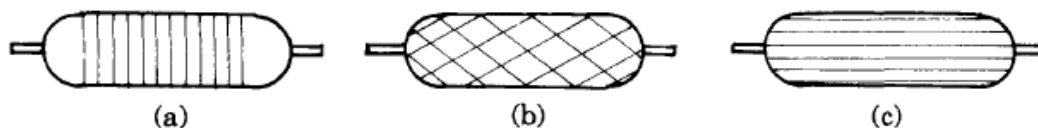



***Figura 2.5*** *Tipi di avvolgimenti: (a) circonferenziale; (b) elicoidale; (c) polare*

Una progettazione ben mirata tende ad allineare i filamenti lungo la direzione in cui la struttura è maggiormente sollecitata. Spesso, le diverse esigenze portano la struttura ad essere realizzata mediante l'accoppiamento di più tipi di avvolgimento. Di solito le fibre sono deposte sul mandrino, ruotante intorno al suo asse con velocità angolare ω(t), da un braccio, dotato di occhiello di deposizione, che si muove con velocità v(t) su un asse parallelo all'asse del mandrino. Il rapporto ω/v fissa, istante per istante, l'angolo di avvolgimento, che può quindi essere variato agendo su questi parametri. Già da questi brevi cenni, si può comprendere come il progetto del mandrino sia legato ad una serie di fattori, il cui attento esame fornisce le indicazioni più idonee per una particolare applicazione.

## 2. 3 ESTRUSIONE

L'estrusione prevede l'utilizzo di pellets a matrice termoplastica rinforzata con fibre del tipo corto. Tale composito viene riscaldato fino ad acquisire sufficiente fluidità tale poter scorrere, grazie alla spinta esercitata da una o due viti,  lungo un condotto che conduce ad uno stampo posto all'estremità da cui il composito passa ed assume la sezione voluta.

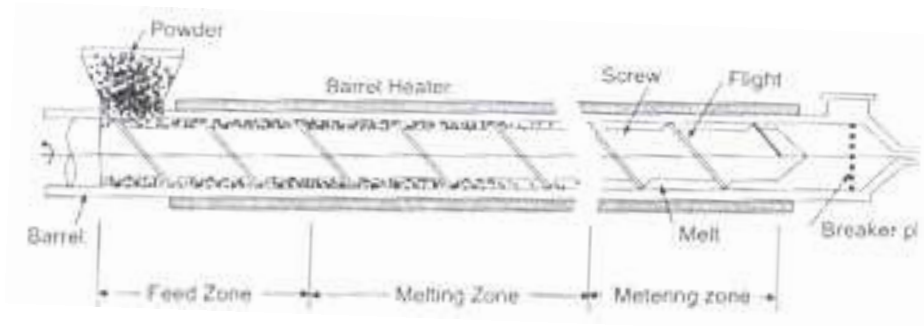



***Fig.2.6*** *Schema del processo di Estrusione*

## 2. 4 PULTRUSIONE

La pultrusione è un processo automatico e continuo ed uno dei più economici per la fabbricazione di materiali plastici rinforzati con fibre.

Il termine del processo deriva dall'inglese "pultrusion" ovvero, "pull" che significa "tirare", "extrusion" che significa "estrusione". A differenza del classico proceso di estrusione, in cui il materiale viene spinto, nella pultrusione il materiale che costituirà il pezzo finito viene tirato per passare attraverso una trafila sagomata.

Il processo comprende una macchina per trazione dei profilati, un forno a tunnel, uno stampo riscaldato, una vasca preriscaldata di impregnazione della resina al fine di ridurre il picco iniziale di viscosità, un essiccatoio per le fibre, il cui scopo è quello di favorire l'adesione tra le fibre e la resina ed eventualmente una camera di post-polimerizzazione. La seguente figura mostra lo schema di una macchina per la pultrusione; in essa sono evidenziati, oltre ai già citati elementi guide per il trasporto e la predisposizione delle fibre, le bobine di fibra (cantra).

Con la tecnologia della pultrusione è possibile produrre profilati rettilinei in materiale composito che abbiano sezione di forma qualunque.

Come visto per il filament winding, anche per la pultrusione esistono il metodo umido (wet method) e quello che fa uso di preimpregnati.

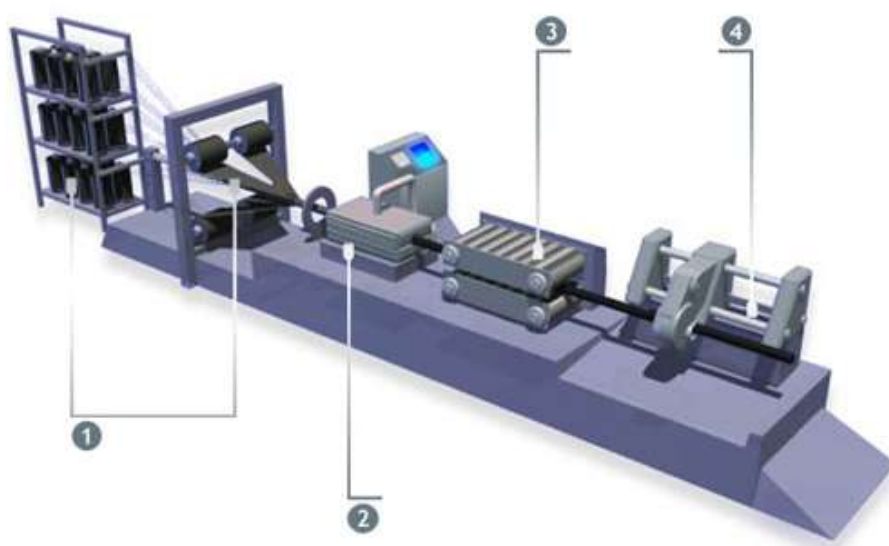



***Fig.2.7*** *Schema del processo di pultrusione*

Nella figura precedente si ha:

1. cantra
2. impregnazione preformatura, formatura per trafila, e polimerizzazione
3. puller o tiro
4. unità di taglio e post formatura

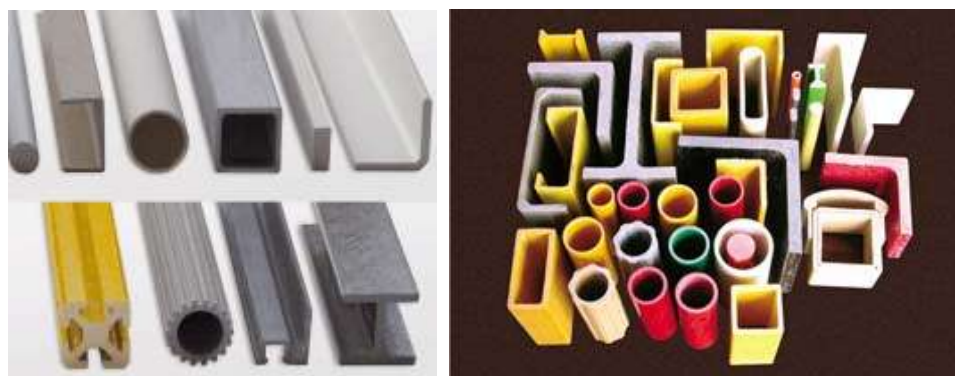



***Fig.2.8*** *Alcuni profili pultrusi*

## 2. 5 PROCESSI A STAMPO CHIUSO

Nell'accezione più generale, i processi a stampo chiuso sono quelli mediante i quali si fabbricano compositi a matrice polimerica trasferendo le miscele polimero/rinforzo o i semplici polimeri in una cavità avente la forma del pezzo. Nel caso di iniezione di solo polimero termoindurente, il rinforzo asciutto viene preliminarmente posto nella cavità, prima dell'iniezione di

resina. La cavità si realizza quando le due metà di stampo, e controstampo, vengono chiuse.

Tali processi sono costosi, in gran parte dipendenti dalla complessità degli stampi, ma il loro prezzo è giustificato in caso di produzione di un grande numero di pezzi in tempi ridotti riducendo in tal modo i costi unitari. A differenza della pultrusione e dell'estrusione, i processi a stampo chiuso sono discontinui.

Particolare cura deve essere posta nella progettazione degli stampi, meglio a geometria semplice, specie quando si usano alte pressioni. Gli stampi, di solito plastici o metallici, devono inoltre resistere alla abrasione derivata dai ripetuti cicli di lavoro.

## 2.5.1 INJECTION MOLDING

L'injection molding è il più comune e ampiamente usato processo di realizzazione di parti di grandi dimensioni con polimeri termoplastici. La differenza fondamentale col processo di estruzione sta nel fatto che l'estruzione permette di realizzare profili continui, mentre l'injection molding parti di dimensioni finite, quindi è un processo discontinuo.

Pellets di resina contenenti fibre corte alimentano un serbatoio riscaldato con una vite rotante. Il calore fonde la resina termoplastica e grazie alla vite si ha la completa miscelazione con il rinforzo. Con il suo movimento la vite è come se agisse come un pistone nel senso che fa scorrere la miscela all'interno di un cilindro mantenuto a temperatura che sfocia all'interno di uno stampo dalla forma e dimensioni volute. Lo stampo è tenuto ad una temperatura inferiore alla $T_g$ in modo che il composito non appena riempito la cavità possa solidificarsi. Non appena avvenuto quest'ultimo passo il pezzo può essere estratto dallo stampo.

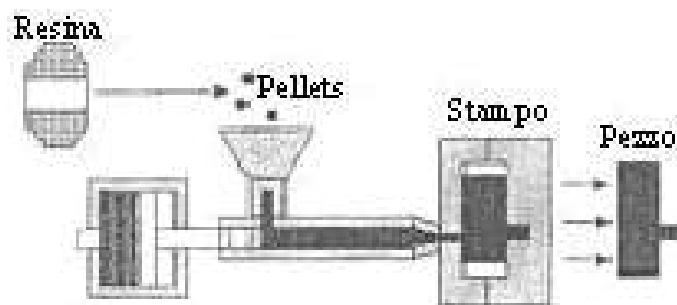



***Fig.2.9*** *Schema del processo di Injection Molding*

## 2.5.2 COMPRESSION MOLDING

Tale processo, utilizzato quando si desidera un elevato volume di produzione nell'unità di tempo, consiste in tre operazioni. Nella prima il materiale, chiamato *carica*, viene deposto all'interno della cavità dello stampo. Nella seconda il composito assume la forma desiderata in quanto uno stampo maschio, attraverso cui viene impressa meccanicamente la pressione, si incunea all'interno dello stampo femmina su cui è posto la carica. In questo modo si ottiene la forma della cavità e, nella treva fase, aprendo lo stampo si può estrarre la parte.

Una grande varietà di compositi sono stampati per compressione. I più comuni sono i *sheet molding compound (SMC)* costituiti da una resina termoindurente parzialmente reticolata in cui sono disperse delle fibre corte.

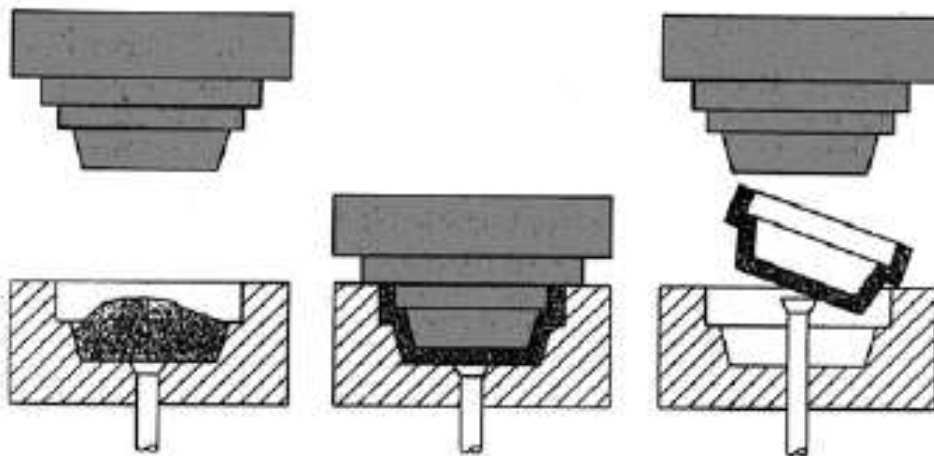



***Fig.2.10*** *Schema del processo di Compression Molding*

## 2.5.3 STAMPAGGIO PER TRASFERIMENTO DI RESINA PER EFFETTO DEL VUOTO (BAG MOLDING)

Questo processo viene di solito usato per pezzi grandi e complessi con ottima finitura su una superficie.

La polimerizzazione avviene di solito a temperatura ambiente e gli stampi sono di plastica mentre nel caso di polimerizzazione ad alta temperatura si fa uso di stampi metallici. Il preformato è posto sopra lo stampo maschio mentre quello femmina che consiste in un semplice sacco da vuoto chiude

il tutto. A questo punto la resina viene inserita nella vasca alla base dello stampo mentre il vuoto viene creato da una apposita uscita posta in cima allo stampo eliminando l'aria dal rinforzo. All'uscita della resina pura, viene chiuso il sistema di vuoto lasciando polimerizzare il pezzo a temperatura ambiente o riscaldandolo.

Dopo indurimento della resina il pezzo viene staccato grazie ad una valvola posta allo stampo maschio insufflando aria in pressione.

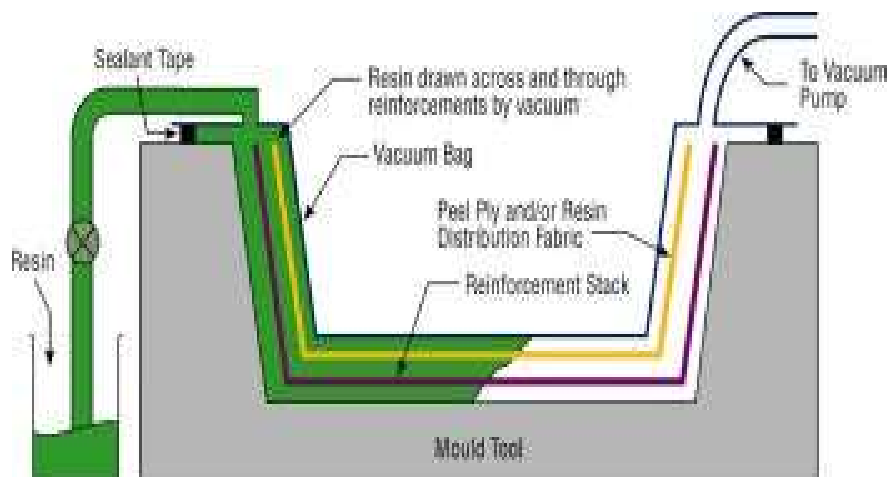



***Fig.2.11*** *Schema del processo di Bag Molding*

## 2.5.4 RESIN TRANSFER MOLDING (RTM)

Il Resin Transfer Molding (RTM) è un processo a stampo chiuso che permette la realizzazione di compositi in diverse forme, dimensioni e prestazioni. Il processo si differenzia dagli altri tipi di stampaggio sia per il tipo di polimero impiegabile (solo termoindurente) e per il fatto che il rinforzo e la resina sono combinati all'interno dello stampo.

I vantaggi consistono nella possibilità di realizzare una superficie liscia su ambedue i lati del pezzo, produrre pezzi complessi con una elevata accuratezza di dettaglio e realizzare parti che non necessitano di laboriose operazioni di rifinitura.

Altri punti a favore sono cicli di produzione veloci (a seconda delle condizioni di reticolazione della resina), ottimo controllo di vuoti ed elevate percentuali di rinforzo, mentre lo svantaggio più grande è la spesa iniziale dello stampo e della macchina RTM.

Il RTM consiste in un processo in cui due o più componenti reattivi vengono opportunamente miscelati e iniettati nello stampo rigido chiuso ove precedentemente è stata posizionata una preforma in fibra.

La geometria dello stampo, quindi del pezzo finito, la scelta dei punti di iniezione, la pressione di iniezione, la scelta della preforma e della resina rappresentano i punti critici di uno stampaggio RTM.

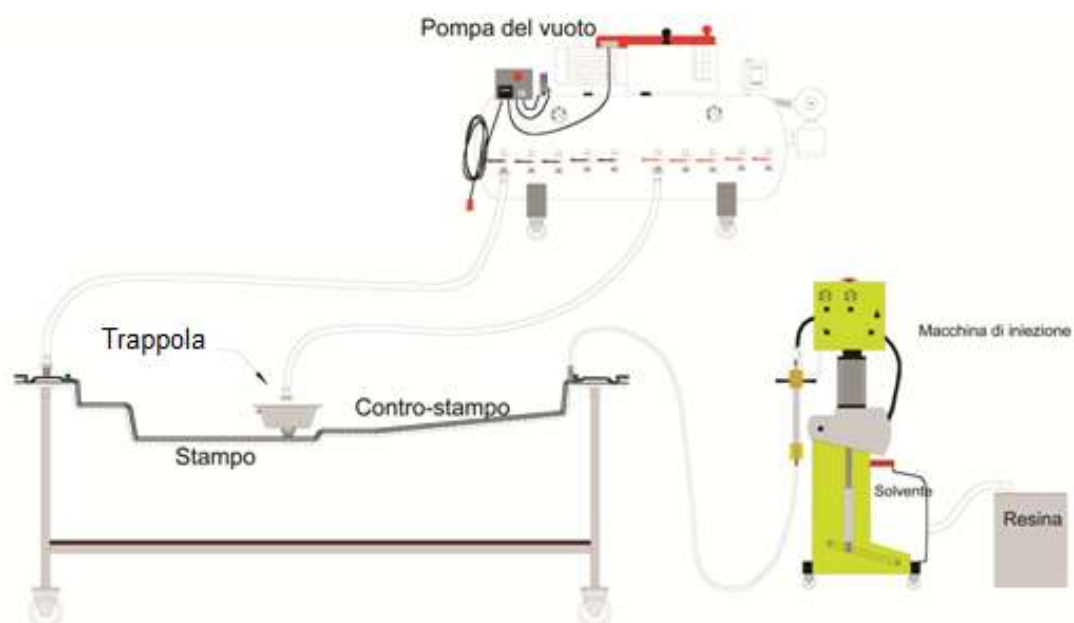



***Fig.2.12*** *Schema del processo di Resin Transfer Molding*

Per realizzare cicli brevi, gli stampi devono essere uniformemente riscaldabili alla corretta temperatura di reticolazione. La possibilità di riscaldare lo stampo permette di aumentare la produttività grazie a una iniezione di resina a più bassa viscosità e una maggiore velocità di reticolazione una volta riempito lo stampo.

A causa della natura abrasiva del rinforzo le superfici degli stampi devono essere cromati. Tutti questi requisiti limitano la scelta dei materiali. Per stampi da produzione, l'acciaio rimane il materiale più adatto grazie alla durabilità e alla possibilità di essere facilmente modificato. Per volumi ridotti di produzione o per prototipi stampi in composito sono una alternativa accettabile.

Dato che RTM usa pressioni più basse dello stampaggio a compressione o della iniezione di termoplastici, la forza di chiusura richiesta è considerevolmente più bassa.

Il ciclo di fabbricazione si articola nelle fasi seguenti:

- pulitura dello stampo;
- applicazione della agente distaccante;
- applicazione del gel-coat;
- posizionamento dei tessuti di rinforzo;
- chiusura e bloccaggio dello stampo;
- iniezione o trasferimento della resina;
- polimerizzazione della stessa;
- apertura dello stampo ed estrazione del pezzo;
- operazioni di finitura.

Per quanto riguarda la pulitura dello stampo, si può ottenere o con una soffiatura ad aria compressa, oppure può richiedere l'uso di un raschietto, per rimuovere, da residui di gel-coat a residui di resina, ovviamente, per non rovinare lo stampo, tale raschietto deve essere meno duro, quindi di legno duro, materiale termoplastico, rame, od ottone, se lo stampo è di acciaio. Solo in casi estremi si possono utilizzare solventi come l'acetone, o il cloruro di metilene.

La scelta del distaccante è legata al tipo di resina utilizzata, dal materiale di cui è costituito lo stampo, in termini di caratteristiche superficiali, dalla temperatura di processo, oltre alla finitura superficiale che si vuol ottenere. Si trovano sotto forma di pasta o di liquido, in genere di natura sintetica. L'applicazione dei distaccanti può non essere ripetuta in ogni ciclo, ma l'effetto può durare fino alla produzione di numerosi pezzi consecutivi. Quando si vuole garantire un elevato grado di finitura al pezzo finito o si vuole una particolare finitura si può aggiungere al distaccante un film di gel-coat che costituirà lo strato superficiale del prodotto finito. In genere il gel-coat è costituito da una resina termoindurente piuttosto dura (poliestere, epossidica, o vinilestere), in modo da fornire un efficace rivestimento protettivo per il componente composito. L'adozione di questo strato dà alcuni vantaggi, come una maggiore resistenza all'idrolisi, alla corrosione e, in generale, all'invecchiamento, ma aumenta considerevolmente i tempi di produzione, che dipendono dal raggiungimento dello stato di gelificazione da parte di tale resina, prima che possa continuare il ciclo. Il problema potrebbe essere by-passato velocizzando il processo di deposizione, attraverso un riscaldamento dello stampo oppure utilizzando più stampi contemporaneamente (soluzione più costosa). A volte si può passare uno strato ulteriore, prima del gel-coat, in modo da renderlo

impermeabile, sigillandone i pori e le micro irregolarità, cosi da renderlo lucido e liscio, permettendo al prodotto finito di conservarsi più a lungo e permettendo una pulitura più facile.

La deposizione dei tessuto, mediante sovrapposizione, può essere laboriosa visto che si deve adattare allo stampo un sistema soffice che deve essere adattato e rifilato, strato per strato, tenendo debitamente conto dell'orientazione che devono assumere le fibre. A volte, quindi, i tessuti si trovano già conformati come preforme, cioè, per rendere più semplice il posizionamento nello stampo, i tessuti vengono pressati e con l'utilizzo di un legante opportuno li si adatta in un elemento sufficientemente rigido di forma analoga allo stampo, potendo ricorre poi anche ad aggiustamenti locali per i punti critici quali spigoli e bordi. Il posizionamento riguarda, non solo il rinforzo, ma anche eventuali inserti o il core dei sandwich. Ciò che è principalmente importante è l'uniformità della distribuzione delle fibre senza raggrinzamenti, pieghe, increspature, variazioni di spessore non volute, ripiegamenti.

Lo stampo dovrà resistere alla pressione dell'operazione d'iniezione ed alla polimerizzazione, quindi la chiusura del controstampo viene effettuata con morse, bulloni od altri sistemi capaci bloccarlo con la forza sufficiente.

La resina già miscelata viene iniettata attraverso dei canali e dei fori ricavati nello stampo e nel controstampo. Tale operazione si può agevolare applicando una pompa a vuoto che aspiri l'aria dalla cavità attraverso i fori d'uscita ( questi sono i casi evoluti del Vacuum Assisted-RTM o VARTM). La resina da iniettare deve essere sempre superiore al volume dello stampo, tanto che si deve vedere uscire da tutti i canali di sfogo (tale eccesso è quantificato tra il 5% ed il 20%). Ciò dovrebbe assicurare che la cavità si sia riempita completamente. A riempimento avvenuto, prima vengono chiuse le valvole dei condotti di deflusso della resina, e poi quelli d'ingresso, ottenendo un afflusso addizionale (detto pumping-up), che incrementa la pressione, e previene dalle contrazioni, e quindi permette migliori corrispondenza dimensionale, e finitura superficiale. Per quel che riguarda i tempi di polimerizzazione, dipendono dalla miscela resina catalizzatore, ma anche dalle caratteristiche reologiche, e geometriche della cavità, dalla temperatura di iniezione, e di quella dello stampo . E per tutte queste operazioni il pezzo deve rimanere nello stampo, con evidente influenza del ciclo di produzione.

La facilità dell’estrazione dipende dalla complessità geometriche del pezzo e dalle sue dimensioni, quindi, vanno studiate con cura le direzioni di estrazione, che viene normalmente agevolata da un getto d’aria attraverso i fori dello stampo. Nel caso in cui servisse, si può utilizzare un cuneo o altro attrezzo adatto, di cui se ne deve considerare la durezza rispetto al materiale dello stampo, affinché, questo non venga danneggiato.

Infine il pezzo sarà rifinito eliminando le protuberanze dovute ai fori, d’ingresso e di uscita, e le frange lasciate dal punto di contatto tra stampo e controstampo, nonché sarà verniciato o comunque costituirà un semilavorato.

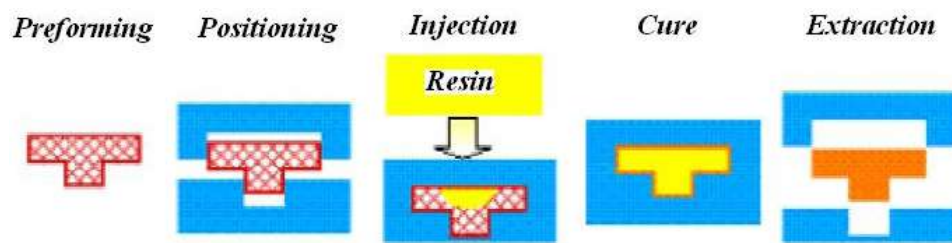



***Fig.2.13** Fasi costitutive del processo di RTM*

Esistono diverse varianti del processo di RTM; le più importanti sono: VARTM (Vacuum assisted RTM), LRTM (Light RTM).

## 2.5.5 VACUUM ASSISTED-RTM (VARTM)

L’attrezzatura è simile a quella del RTM classico. Si utilizzano stampo e controstampo in acciaio. L’iniezione della resina è favorita dall’applicazione del vuoto a valle dello stampo; questo ha il duplice scopo di degasare la preforma ed aumentare la differenza di pressione. L’iniezione avviene nella parte centrale dello stampo mentre il vuoto viene applicato ai bordi. L’utilizzo di questa tecnica permette di ottenere manufatti con un ridotto contenuto di vuoti e una maggiore percentuale di fibra rispetto al RTM classico.

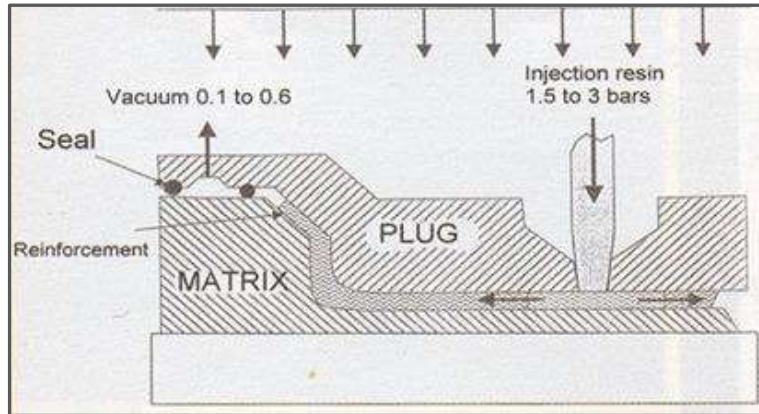



***Fig.2.14*** *Schema del processo di Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*

## 2.5.6 LIGHT -RTM (LRTM)

Il LRTM utilizza tipicamente uno stampo rigido e un controstampo realizzato con un materiale flessibile e leggero che non è il sacco da vuoto impiegato nel vacuum bagging. Generalmente stampo e controstampo sono realizzati in vetroresina supportati da un telaio in acciaio che permette di mantenere inalterata la forma e fornisce dei facili punti di afferraggio per la movimentazione.

Le pressioni utilizzate per l'iniezione non superano di norma 1 bar; una pressione troppo elevata potrebbe causare la deformazione dello stampo. Generalmente l'iniezione avviene in un canale sul bordo dello stampo mentre il vuoto viene applicato al centro dello stampo.

Il LRTM ha il vantaggio di ottenere la realizzazione di manufatti con una buona finitura superficiale su entrambe le facce ricorrendo ad attrezzature più economiche (stampo in vetroresina anziché in acciaio) e a personale non altamente qualificato.

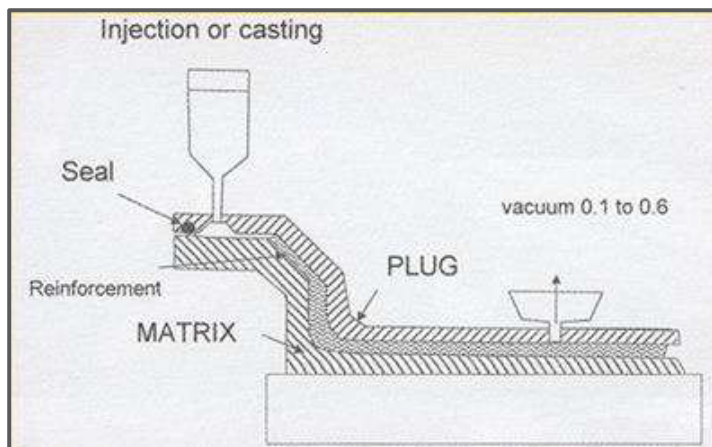



***Fig.2.15*** *Schema del processo di Light Resin Transfer Molding*

CAPITOLO 3

# PROGETTARE CON I MATERIALI COMPOSITI

## 3.1 INTRODUZIONE

La progettazione di qualunque tipo di manufatto prevede la conoscenza delle caratteristiche base del materiale da utilizzare. Nel caso in cui si utilizzino materiali compositi le variabili in gioco aumentano; infatti, non solo si può dimensionare il pezzo in funzione del materiale usato, ma si può anche, facendo variare opportunamente le frazioni volumetriche dei costituenti, creare un materiale che abbia le proprietà desiderate. La capacità di valutare e predire le caratteristiche dei compositi assume quindi un ruolo di primaria importanza in fase di progetto [1-4,83-84].

## 3.2 LA MICROMECCANICA

Oggetto della micromeccanica [1-4,83-84] è la determinazione dei moduli elastici di un materiale composito partendo da quelli dei costituenti; oggetto complementare dell'analisi micromeccanica è la determinazione delle capacità di resistenza in termini di sollecitazione di rottura.

Le ipotesi di base sono:

- Perfetta adesione tra fibra e matrice;
- Fibre continue e disposte tutte perfettamente parallele le une alle altre;
- le fibre e la matrice sono materiali lineari elastici, quindi seguono approssimativamente la legge di Hooke e ciascun modulo elastico è costante
- Assenza di vuoti

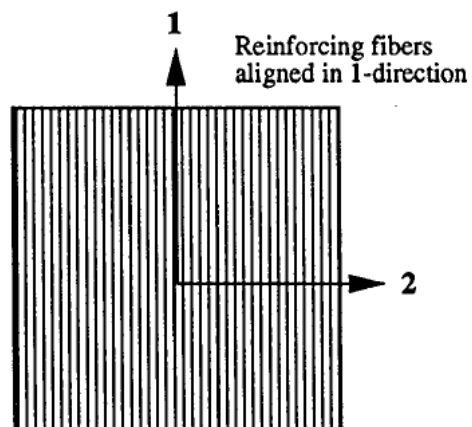



***Fig. 3.1*** *Lamina con rinforzo unidirezionale*

Si possono quindi definire due direzioni principali, indicate con i pedici 1 e 2, rispettivamente per la direzione parallela e ortogonale alle fibre.

### 3.2.1 DETERMINAZIONE DI $E_1$

Si prenda in esame un volume elementare di composito come in figura 3.2

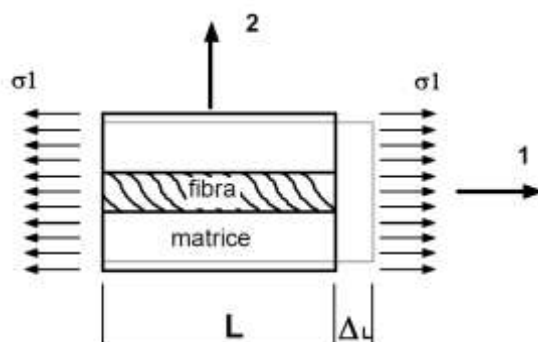



***Fig. 3.2*** *Volume di composito sollecitato in direzione del rinforzo*

la deformazione

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L} \qquad (1)$$

sotto l'ipotesi di perfetta aderenza, sarà uguale sia per la fibra che per la matrice

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_f = \varepsilon_m \qquad (2)$$

Le sollecitazioni nei singoli materiali risultano essere:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 \tag{3}$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_1 \tag{4}$$

Definiamo con $\sigma_1$ la sollecitazione media agente sulla sezione A, con $\sigma_f$ la sollecitazione media della fibra e con $\sigma_m$ la sollecitazione della matrice sulla sezione $Am$ della matrice.

Per l'equilibrio nel senso della fibra

$$P = \sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m Am \tag{5}$$

sostituendo la (2), la (3) e ricordando che

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \tag{6}$$

si ottiene:

$$E_1 = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} \tag{7}$$

essendo le frazioni in volume della fibra e della matrice:

$$v_{f=} \frac{A_f}{A} \qquad v_{m=} \frac{A_m}{A} \tag{8}$$

risulta

$$E_1 = E_f v_f + E_m v_m \tag{9}$$

Questa espressione del modulo di Young apparente in direzione delle fibre è conosciuta come "***regola delle miscele***".

### 3.2.2 DETERMINAZIONE DI $E_2$

Per la determinazione del modulo di Young [1-4,83-84] apparente in direzione trasversale alla fibra si assume la sollecitazione trasversale $\sigma_2$ applicata sia alla fibra che alla matrice.

$$\sigma_2 = \sigma_f = \sigma_m \qquad (10)$$

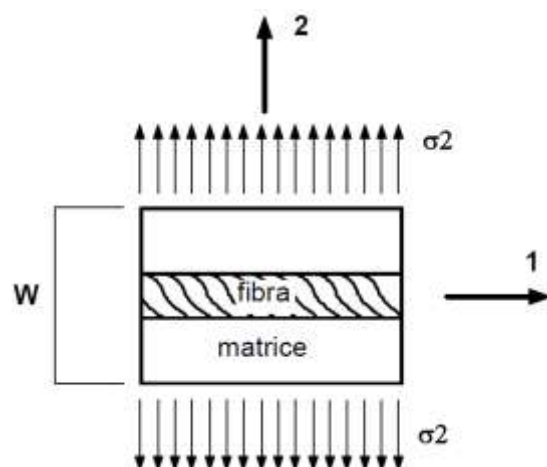



***Fig. 3.3*** *Volume di composito sollecitato in direzione trasversale al rinforzo*

Le deformazioni sono perciò

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m} \qquad (11)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \qquad (12)$$

la dimensione trasversale su cui agisce la $\varepsilon_f$ è approssimativamente $V_f W$ ,mentre la $\varepsilon_m$ agisce su una porzione $V_m W$; la deformazione trasversale risulta:

$$\varepsilon_2 W = v_f W \varepsilon_f + v_m W \varepsilon_m \qquad (13)$$

semplificando

$$\varepsilon_2 = v_f \varepsilon_f + v_m \varepsilon_m \qquad (14)$$

sostituendo la (8) e la (9)

$$\varepsilon_2 = v_f \frac{\sigma_2}{E_f} + v_m \frac{\sigma_2}{E_m} \qquad (15)$$

ricordando che

$$\sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 \quad (16)$$

si ottiene

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{v_m E_f + v_f E_m} \quad (17)$$

Con considerazioni simili si possono ricavare i valori dei coefficienti di Poisson e del modulo tangenziale:

$$\nu_{12} = v_m \nu_m + v_f \nu_f \quad (18)$$

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{v_m G_f + v_f G_m} \quad (19)$$

### 3.2.3 RESISTENZA A TRAZIONE NELLA DIREZIONE DELLE FIBRE

Nel caso più generale, un composito unidirezionale si deforma all'aumentare del carico secondo quattro fasi, in funzione delle relative fragilità e duttilità di fibre e matrice [1-4,83-84].

1) fibre e matrice si deformano elasticamente;
2) le fibre si deformano ancora elasticamente ma la matrice comincia a deformarsi plasticamente;
3) fibre e matrice si deformano plasticamente;
4) si verifica la rottura delle fibre, seguita dal cedimento di tutto il composito.

Naturalmente, nel caso di comportamento fragile delle fibre, la fase 3) non si verifica. Se è la matrice ad essere fragile non avvengono la fase 2) e la 3). E' bene evitare, in fase di scelta dei costituenti, questa evenienza, per sfruttare in pieno le proprietà delle fibre di rinforzo.

La rottura del composito avviene, quindi, alla rottura delle fibre o della matrice in dipendenza della relativa duttilità.

Considerando il caso di fibre che hanno tutte uguale resistenza a trazione e sono relativamente fragili rispetto alla matrice. Se il composito ha più di un certo valore di percentuale in volume di fibre, tale che queste risultino di

effettivo rinforzo alla matrice, il carico ultimo è determinato dal carico ultimo delle fibre.

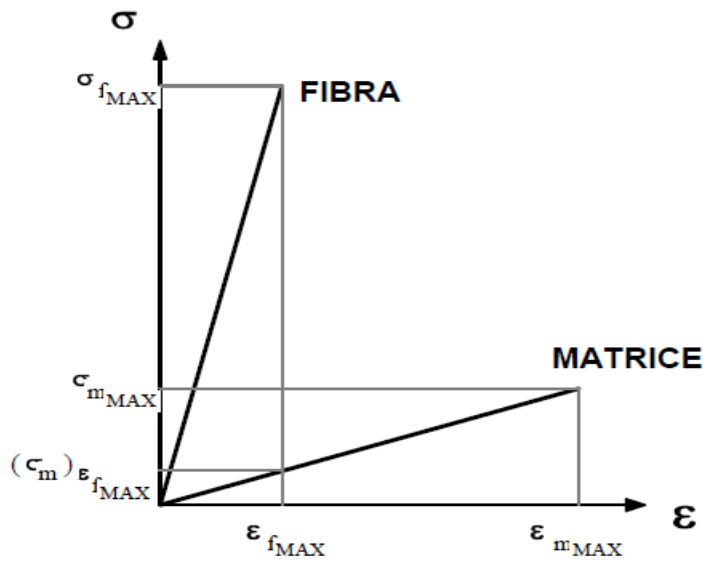



***Fig. 3.3*** *Diagramma sforzo-deformazione della fibra e della resina*

Si può quindi desumere che se

$$\varepsilon_{c_{max}} = \varepsilon_{f_{max}} \qquad (20)$$

la resistenza del composito è, quindi, data da

$$\sigma_{c_{max}} = \sigma_{f_{max}} v_f + \sigma_{m_{\varepsilon_{f_{max}}}} (1 - v_f) \qquad (21)$$

dove

$\sigma_{f_{max}}$ = massima sollecitazione della fibra

$\sigma_{m_{\varepsilon_{f_{max}}}}$ = sollecitazione della matrice alla massima deformazione della fibra

Naturalmente l'effetto di rinforzo vale se:

$$\sigma_{c_{max}} > \sigma_{m_{max}} \qquad (22)$$

Risolvendo la (22) insieme alla (21) si può determinare il $v_f$ critico che deve essere superato per ottenere un effettivo rinforzo della matrice:

$$v_{f_{cr}} = \frac{\sigma_{m_{max}} - \sigma_{m_{\varepsilon_{f_{max}}}}}{\sigma_{f_{max}} - \sigma_{m_{\varepsilon_{f_{max}}}}} \quad (23)$$

Per valori più piccoli di $v_f$ , il comportamento del composito può non essere quello dettato dalla (21) perché le fibre sarebbero soggette ad alte deformazioni e quindi il composito si romperebbe. Se le fibre cedessero tutte insieme il composito si romperebbe a meno che l'intero carico non fosse sopportato dalla matrice, ovvero:

$$\sigma_{c_{max}} < \sigma_{m_{max}} v_m \quad (24)$$

Per cui il composito si rompe a causa delle frattura delle fibre se:

$$\sigma_{c_{max}} = \sigma_{f_{max}} v_f + \sigma_{m_{\varepsilon_{f_{max}}}} (1 - v_f) \geq \sigma_{m_{max}} (1 - v_f) \quad (25)$$

dalla quale si ottiene il valore minimo di $v_f$:

$$v_{f_{min}} = \frac{\sigma_{m_{max}} - \sigma_{m_{\varepsilon_{f_{max}}}}}{\sigma_{f_{max}} + \sigma_{m_{max}} - \sigma_{m_{\varepsilon_{f_{max}}}}} \quad (26)$$

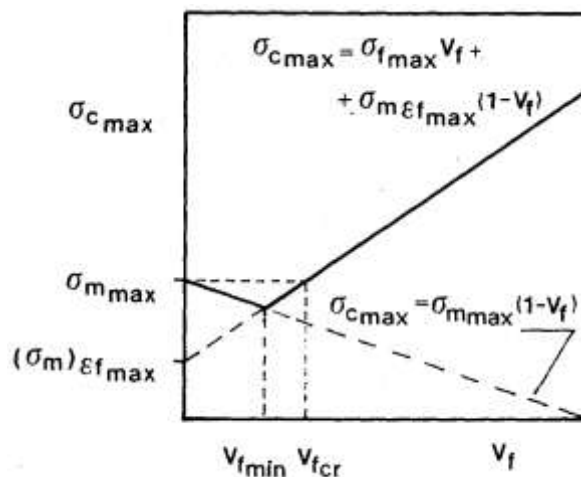



***Fig. 3.4*** *Resistenza del composito al variare della frazione volumetrica di fibra*

Quando $v_f$ è minore di $v_{f_{min}}$, la resistenza del composito è controllata dalla deformazione della matrice ed è minore della resistenza della matrice. Se $v_f$ è più grande di $v_{f_{min}}$, ma minore di $v_{f_{cr}}$, la resistenza del composito è

controllata dalla deformazione della fibra pur rimanendo più bassa di quella della sola matrice. Solo se $v_f$è più grande di $v_{f_{cr}}$ si ha un effettivo rinforzo della matrice.

La forma delle curve di figura 3.4 dipende dal $v_{f_{cr}}$; tale percentuale in volume di fibre è piccola se:

$$\sigma_{m_{max}} \cong \sigma_{m_{\varepsilon_{f_{max}}}} \tag{27}$$

ed in questo caso le fibre risultano sempre di rinforzo per la matrice dato che

$$v_{f_{min}} < v_{f_{cr}} \tag{28}$$

L'analisi micromeccanica ha delle limitazioni; basti pensare che, presupposto per l'analisi, è l'ipotesi per cui fibra e matrice abbiano perfetta adesione, cosa non completamente realizzabile nei compositi. Una unione imperfetta porta ad un materiale le cui proprietà sono inferiori rispetto a quelle dell'analisi micromeccanica.

Il divario tra i valori calcolati in base all'analisi micromeccanica e i dati sperimentali ottenuti diventa più ampio se trattiamo compositi rinforzati con fibre naturali di origine vegetali. Esse infatti, rispetto alle fibre sintetiche, presentano una minore aderenza tra fibra e matrice dovuta alla natura idrofila delle fibre e alla natura idrofoba delle matrici; inoltre le fibre sintetiche sono lunghe e hanno un diametro controllato mentre le fibre naturali sono generalmente corte, hanno un diametro variabile e non hanno un comportamento isotropo; infine, l'utilizzo di un rinforzo di origine vegetale determina inevitabilmente la presenza di un certo quantitativo di vuoti non eliminabili perchè intrinseci nel materiale (lumen delle fibre).

Ulteriore limite dell'analisi micromeccanica è che si è in grado di prevedere solo il comportamento di materiali rinforzati con fibre unidirezionali e parallele. Per ovviare a questi, ed altri, inconvenienti sono stati introdotti diversi altri metodi previsionali, sicuramente di maggiore complessità della semplice "regola delle miscele", in quanto cercano di tenere in conto i parametri che fanno deviare il comportamento di un composito rinforzato con fibre vegetali da uno con fibre sintetiche ad orientazione preferenziale. Nel seguito vengono riportati due modelli

previsionali che costituiscono in sequenza l'evoluzione nella predizione delle proprietà dei compositi: il modello di Cox-Krenchel e quello di Madsen. Entrambi traggono spunto dalla regola delle miscele e ne propongono una versione "modificata" con lo scopo di ridurre la sovrastima generata dal calcolo tradizionale.

### 3.2.4 IL MODELLO DI COX-KRENCHEL

Tale modello [85-86] permette di calcolare rigidezza e resistenza di compositi rinforzati con fibre di diverse lunghezze e con una disposizione spaziale qualunque.

Il modulo del composito E è correlato al modulo delle fibre $E_f$ e delle matrice $E_m$ e alla percentuale in volume di fibra $v_f$ da una regola delle miscele del tipo:

$$E = \eta_{oE}\eta_{lE}E_f v_f + (1 - v_f)E_m \quad (29)$$

In cui

$\eta_{oE}$ è il fattore di orientazione delle fibre

$\eta_{lE}$ è il fattore di efficienza di lunghezza delle fibre

per il calcolo di tali fattori Cox propone la seguente espressione

$$\eta_{oE} = \sum_n a_n cos^4\phi_n \quad (30)$$

dove $a_n$ rappresenta la frazione di fibra ad ogni specifica orientazione, $\phi_n$ è l'angolo di orientazione dell'n-esima fibra.

Nella tabella 3.1 sono riportati alcuni valori di $\eta_{oE}$ per i più comuni impaccamenti delle fibre.

***Tab. 3.1*** *Fattore di orientazione pe alcuni tipi di impaccamento*

| impaccamento | $\eta_{oE}$ |
|---|---|
| **Random 2d (tessuti Mat)** | $^3/_8$ |
| **Random 3D** | $^1/_5$ |
| **unidirezionale** | 1 |
| **Bidirezionale 0-90** | $^1/_2$ |

Per fibre di lunghezza *l* il fattore di efficienza di lunghezza delle fibre vale:

$$\eta_{lE} = 1 - \frac{\tanh(\beta l/2)}{\beta l/2} \tag{31}$$

dove

$$\beta = \frac{1}{r_f}\sqrt{\frac{2G_m}{E_f \ln(R/r_f)}} \tag{32}$$

e

$G_m$ : modulo di taglio della matrice

$r_f$ : raggio della fibra

R : si riferisce alla spaziatura tra le fibre

Il rapporto $R/r_f$ può essere espresso come

$$\frac{R}{r_f} = \sqrt{\frac{K_r}{v_f}} \tag{33}$$

Il fattore numerico $K_r$ nel caso di impaccamento spaziale piano è pari a $\pi/4$.

Se la lunghezza delle fibre di rinforzo non è costante, bensì variabile con la distribuzione della densità data da *h(l)*

$$\eta_{lE} = \frac{1}{(l)}\int_0^\infty \left(1 - \frac{\tanh(\beta l/2)}{\beta l/2}\right) lh(l)dl \tag{34}$$

Per la valutazione della resistenza a trazione, anche in questo caso dalla regola delle miscele la resistenza a trazione di un composito $\sigma_{uc}$ può essere espressa dalla relazione:

$$\sigma_{uc} = \eta_s \sigma_{uf} v_f + (1 - v_f)\sigma_m \tag{35}$$

dove

$\sigma_{uf}$ : è la resistenza delle fibre

$\sigma_m$ : è lo sforzo nella matrice alla massima deformazione delle fibre

Quest'ultimo, nel caso di costituenti lineari elastici, può essere calcolato come

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{uf} E_m}{E_f} \quad (36)$$

$\eta_s$ è detto invece *fattore di efficienza delle fibre;* esso può essere decomposto in:

$$\eta_s = \eta_{ls} \eta_{os} \quad (37)$$

dove

- $\eta_{os}$ è il fattore di orientazione delle fibre e può avere una interpretazione simile a quella utilizzata per il calcolo del modulo elastico;
- $\eta_{ls}$ è il fattore di efficienza di lunghezza delle fibre che può in questo caso essere calcolato come:

$$\eta_{ls} = \begin{cases} 1 - l_c/2l & l \geq l_c \\ l/2l_c & l \leq l_c \end{cases} \quad (38)$$

La lunghezza critica delle fibre $l_c$ può essere calcolata dalla seguente espressione

$$l_c = \frac{\sigma_{uf} r_f}{\tau} \quad (39)$$

in cui $\tau$ è lo sforzo di taglio all'interfaccia.

Fibre troppo corte non costituiscono un effettivo rinforzo, ma, al contrario, tendono a peggiorare le qualità del composito rispetto alla matrice

## 3.2.5 IL MODELLO DI MADSEN

Il modello di Madsen [87-91] propone anch'esso una versione modificata della regola delle miscele, espressa da:

$$E_c = (\eta_o \eta_l v_f E_f + V_m E_m)(1 - v_p)^n \quad (40)$$

$$\sigma_{uc} = (\eta_s v_f \sigma_{uf} + v_m \sigma_m)(1 - v_p)^n \quad (41)$$

Al fattore di orientazione delle fibre $\eta_o$, al fattore di efficienza di lunghezza delle fibre $\eta_l$ e al fattore di efficienza delle fibre $\eta_s$ può essere datala stessa interpretazione data nel modello di Cox-Krenchel.

Tuttavia $\eta_l$ tende rapidamente ad 1 al crescere del rapporto $L/D$; ciò è mostrato graficamente in figura 3.5.

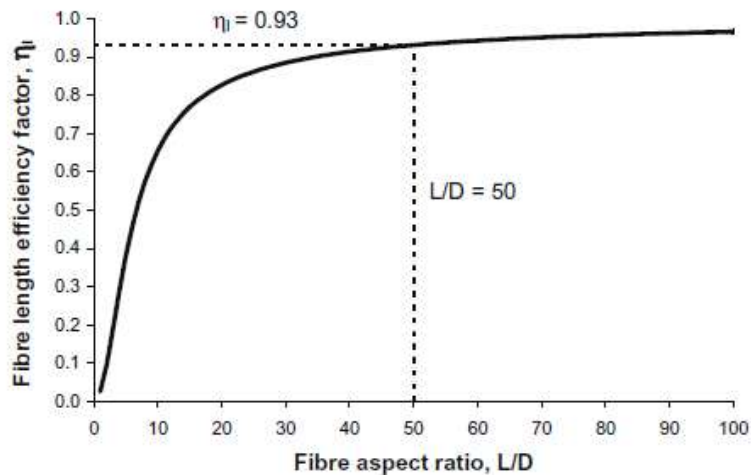



***Fig. 3.5*** *Fattore di efficienza di lunghezza delle fibre al variare del rapporto L/D*

- $\eta_l$ cresce rapidamente fino a circa 0,8 quando $L/D$ è circa 20 e, successivamente, cresce asintoticamente avvicinandosi ad 1 per $L/D$ tendente ad infinito. Per valori di $L/D$ pari a 50 $\eta_l$ è pari a 0,93. Di conseguenza, si può dedurre che per fibre che presentano un rapporto tra lunghezza e diametro superiore a 50, le variazioni di $\eta_l$ sono di marginale importanza e tale parametro può essere considerato circa 1. $\eta_l$ sarà comunque incluso nelle equazioni del modello per sottolineare l'importanza di questo parametro per compositi con fibre di lunghezze ridotte.
- $v_p$ è la frazione percentuale in volume di porosità intrinseca al composito. I compositi rinforzati con fibre naturali possiedono, infatti, una certa quantità di vuoti dovuti a diversi fattori; la natura e l'andamento di tali vuoti sarà trattato in dettaglio nel seguito.
- *n* indica l'esponente di efficienza della porosità, e dà una quantificazione dell'effetto della porosità sulle proprietà del composito; se *n* vale zero la porosità non ha alcun effetto. Tale esponente di efficienza della porosità è un parametro empirico e

può essere determinato numericamente allineando i dati sperimentali. Tuttavia, in una vasta gamma di sistemi compositi rinforzati con fibre vegetali, si è rilevato che $n$ = 2 dà generalmente un buon allineamento con i dati sperimentali; un valore pari a 2, che ben si adatta ai nostri scopi, sarà quindi utilizzato nella presente trattazione.

## 3.2.6 LA POROSITÁ

I modelli previsionali presentati in precedenza (Regola delle Miscele e Cox-Krenchel) sono per lo più incentrati sullo studio delle relazioni esistenti tra fibra e matrice e hanno trascurato l'esistenza di una terza parte: la porosità. Tale parametro è invece preso in considerazione dal modello di Madsen [87-91].

I compositi rinforzati con fibre vegetali contengono in genere una relativamente grande quantità di vuoti, che influenzano notevolmente le proprietà e le prestazioni dei compositi.

La porosità che è rappresentata da cavità riempite d'aria all'interno di un materiale altrimenti continuo, è spesso parte inevitabile in tutti i compositi e si sviluppa durante la miscelazione e il consolidamento delle due diverse parti del materiale. Con i compositi in fibra sintetica è stata ormai acquisita una notevole conoscenza per tenere bassa la porosità (percentuali in volume al di sotto dell 1%). Al contrario, la percentuale in volume di porosità nei materiali compositi rinforzati con fibre vegetali costituisce una parte consistente del volume globale del composito.

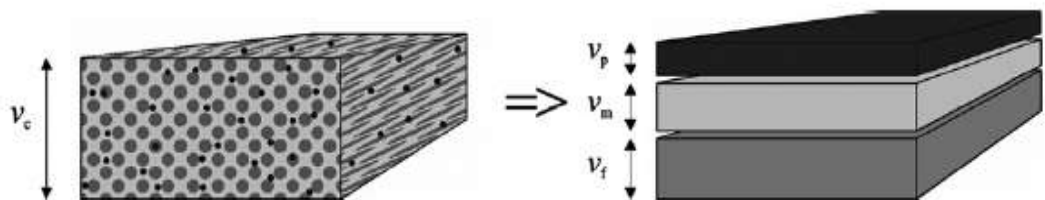



***Fig. 3.6*** *Illustrazione schematica della separazione di volume assoluto di un materiale composito (VC) in tre volumi costituenti assoluto di fibre ($v_f$), matrice ($v_m$) e porosità ($v_p$). I volumi dei materiali sono rappresentati come lastre con spessori in proporzione alle loro dimensioni volumetriche*

La maggior parte della porosità nei compositi in fibra vegetale è causata da una serie di fattori:

I. l'esistenza della cavità interna alla fibra detta *lumen*;
II. la diversa natura chimica tra fibra e matrice che complica la compatibilizzazione;
III. l'eterogenea forma e dimensione delle fibre vegetali che limita l'impregnazione da parte della matrice;
IV. la scarsa tendenza delle fibre ad essere compattate che limita la massima frazione volumetrica di fibre ottenibile.

Emerge quindi che le frazioni volumetriche di fibra, matrice e porosità sono interdipendenti. Per potere ottenere un modello previsionale affidabile è,quindi, fondamentale la conoscenza di tali grandezze.

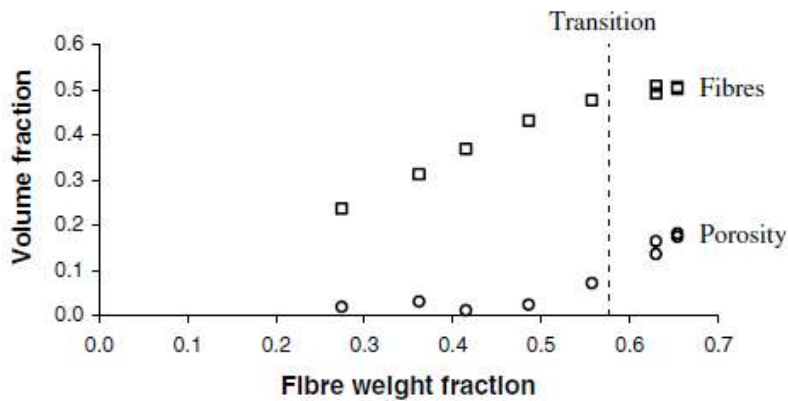



***Fig. 3.7*** *Tipici dati sperimentali per le frazioni in volume delle fibre e di porosità in funzione della frazione in peso di fibre. polietilene tereftalato/ fibre di canapa*

In genere le frazioni in peso di matrice e fibra sono convertite in frazioni volumetriche attraverso la conoscenza delle rispettive densità; ciò presuppone però un contenuto di porosità pari a zero. Se ciò non avviene bisogna integrare i calcoli con il contenuto di porosità.

Il volume di un composito può essere calcolato come

$$V_c = V_f + V_m + V_p \tag{42}$$

dove $V_c, V_f, V_m, e\ V_p$sono rispettivamente i volumi assoluti di composito, fibra, matrice e porosità.

$V_p$ può essere suddiviso in

- *porosità correlata alla fibra* $(V_{pf})$, che si presume linearmente correlato con il volume di fibra assoluto;
- *porosità correlata alla matrice*$(V_{pm})$, che si presume linearmente correlato con il volume assoluto di matrice;
- *porosità strutturale*$(V_{ps})$, che si presenta allorquando la matrice non riesce a riempire gli interstizi tra le fibre compatte;

Il volume assoluto di porosità può, quindi, essere espresso come:

$$V_p = V_{pf} + V_{pm} + V_{ps} = \alpha_{pf} V_f + \alpha_{pm} V_m + V_{ps} \qquad (43)$$

dove i coefficienti α sono detti *costanti di porosità* e sono coefficienti di proporzionalità lineari.

$V_{pf}$ può essere ulteriormente suddiviso in tre sub-componenti:

a) *porosità delle fibre*$(V_{pf(1)})$, che è rappresentata dalle cavità piene d'aria nelle fibre(es. il lumen delle fibre vegetali);

*b)* *porosità di interfaccia* $(V_{pf(2)})$, che è rappresentata da cavità piene d'aria poste nella regione di interfaccia tra fibra e matrice. Questo tipo di porosità può avere origine, sia durante il processo di creazione del composito (a causa della scarsa compatibilità tra fibra e matrice), sia durante l'utilizzo del composito (a causa di stati tensionali che tendono a disaccoppiare fibra e matrice);

*c)* *porosità di impregnazione* $(V_{pf(3)})$, che è rappresentata da cavità tra gli interstizi tra le varie fibre. Tale tipo di porosità è dovuta ad una scarsa impregnazione delle fibre da parte della matrice;

La *porosità correlata alla matrice*$V_{pm}$è rappresentata da cavità presenti nella matrice (es. bolle d'aria intrappolate).

Le quattro sub-componenti della porosità fin qui elencate possono, ad eccezione della porosità di impregnazione, essere valutate osservando una sezione trasversale del composito attraverso il microscopio. La porosità di impregnazione può invece essere valutata dalla formula seguente

$$V_p = (\alpha_{pf(1)} + \alpha_{pf(2)} + \alpha_{pf(3)})V_f + \alpha_{pm}V_m \qquad (44)$$

La distribuzione delle fibre vegetali può essere compattata fino al raggiungimento di un volume minimo (dipendente dalle condizioni di processo) che determina il volume del composito minimo ottenibile $V_{c\,min}$. Di conseguenza si può definire la frazione in volume massima di fibra ottenibile $v_{f\,max}$ come:

$$v_{f\,max} = \frac{V_f}{V_{c\,min}} \qquad (45)$$

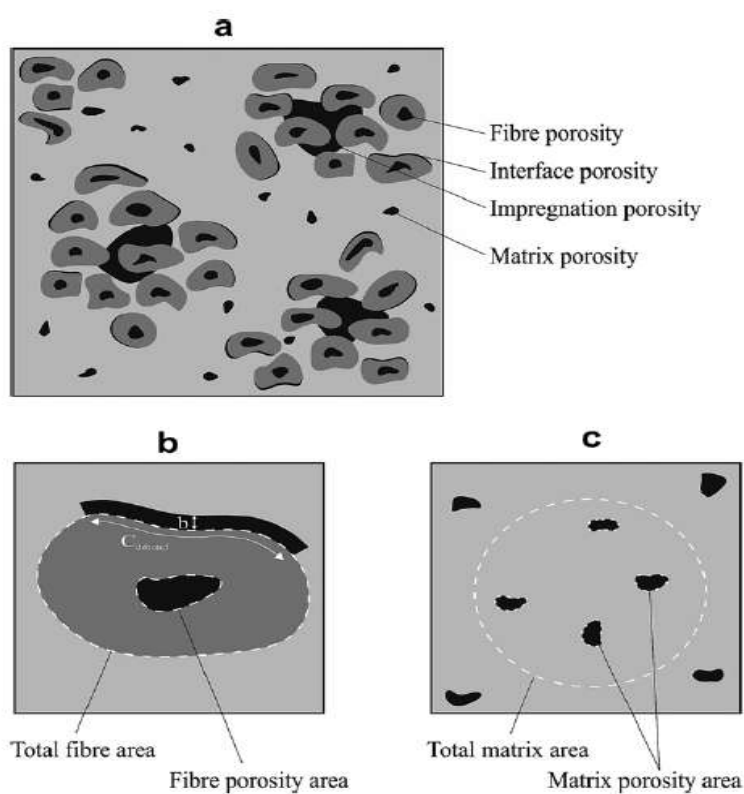



***Fig. 3.8*** *Schematica illustrazione (a) dei quattro sub-componenti della porosità. (B) e (c) rappresentano un ingrandimento di (a), e mostrano in dettaglio le sub-componenti misurabili da una sezione trasversale.*

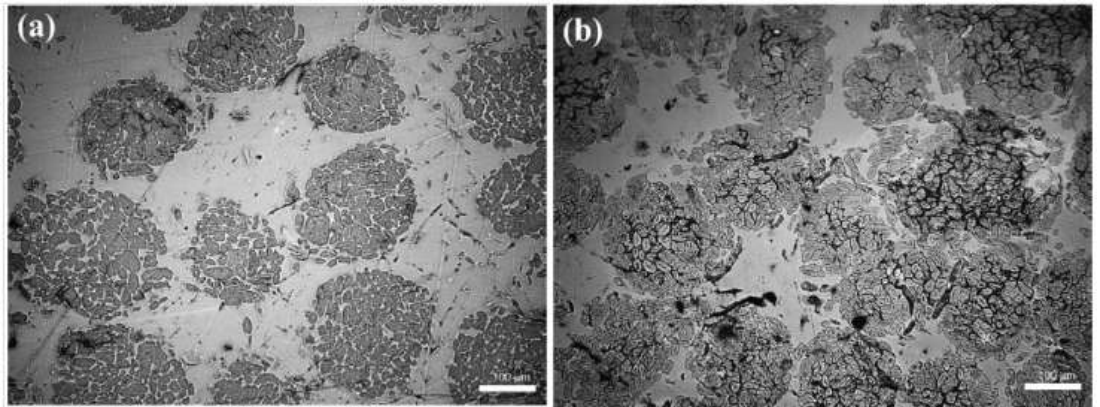



***Fig. 3.9*** *immagine al microscopio elettronico di una sezione trasversale di un composito canapa/ PE*

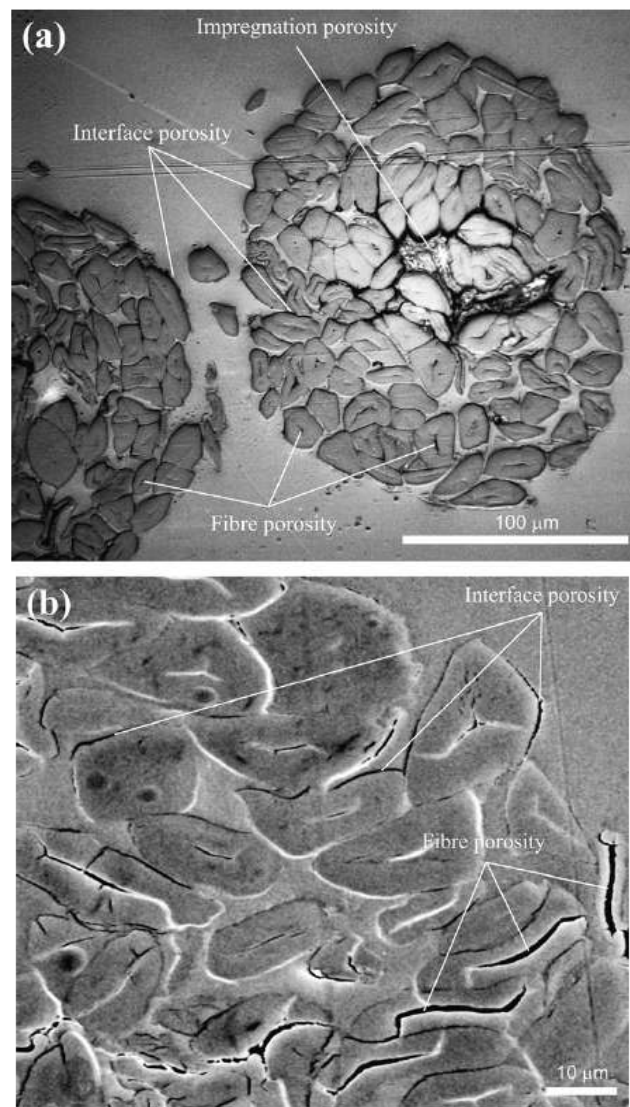



***Fig. 3.10*** *Immagine di una sezione trasversale di un composito canapa/ PE ottenute al microscopio elettronico.*

Esiste dunque un punto di transizione in cui la disposizione spaziale delle fibre è completamente compattata in modo tale da occupare il volume minimo e la quantità di matrice è appena sufficiente per riempire lo spazio libero tra le fibre. Più precisamente questo punto di transizione è definito come la situazione in cui

$$V_f + V_m + V_{pf} + V_{pm} = V_{c\,min} \tag{46}$$

Il punto di transizione delimita quindi due diversi comportamenti tra le interazioni volumetriche:

- caso A in cui la fibra non è completamente compattata, e la matrice è in grado di riempire lo spazio libero tra le fibre;
  $V_c$ è maggiore di $V_{c\,min}$ ed è dato da:

$$V_c = V_f + V_m + V_{pf} + V_{pm} + V_{ps} \Rightarrow$$
$$V_c = V_f + V_m + \sum \alpha_{pf} V_f + \sum \alpha_{pm} V_m + 0 \tag{47}$$

- caso B, la fibra è completamente compattata e la matrice non è in grado di riempire lo spazio libero tra le fibre; viene di conseguenza a crearsi una porosità strutturale $V_{ps}$.
  $V_c$ è adesso uguale a $V_{c\,min}$ ed è dato da:

$$V_c = V_{c\,min} = V_f + V_m + \sum \alpha_{pf} V_f + \sum \alpha_{pm} V_m + V_{ps} = \frac{V_f}{v_{f\,max}} \tag{48}$$

Nel seguito sono riportate le equazioni delle frazioni in volume dei costituenti nei casi A e B in funzione della percentuale in peso di fibra $(w_f)$ presa come variabile indipendente. Si ricorda che gli indici maiuscoli indicano la quantità assoluta mentre gli indici in carattere minuscolo si riferiscono alle frazioni percentuali della grandezza stessa.

La frazione in peso di fibra di transizione $(w_{f\,trans})$ che separa le due regioni viene calcolata in base alla:

$$w_{f\,trans} = \frac{v_{f\,max}\rho_f(1+\alpha_{pm})}{v_{f\,max}\rho_f(1+\alpha_{pm}) - v_{f\,max}\rho_m(1+\alpha_{pf}) + \rho_m} \tag{49}$$

Caso A ($w_f \leq w_{ftrans}$)

$$v_f = \frac{w_f \rho_m}{w_f \rho_m (1+\alpha_{pf}) + (1-w_f)\rho_f (1+\alpha_{pm})} \tag{50}$$

$$v_m = \frac{(1-w_f)\rho_f}{w_f \rho_m (1+\alpha_{pf}) + (1-w_f)\rho_f (1+\alpha_{pm})} \tag{51}$$

$$v_p = \frac{w_f \rho_m \alpha_{pf} + (1-w_f)\rho_f \alpha_{pm}}{w_f \rho_m (1+\alpha_{pf}) + (1-w_f)\rho_f (1+\alpha_{pm})} \tag{52}$$

Caso B ($w_f \geq w_{ftrans}$)

$$v_f = v_{f\,max} \tag{53}$$

$$v_m = v_{f\,max} \frac{(1-w_f)\rho_f}{w_f \rho_m} \tag{54}$$

$$v_p = 1 - v_{f\,max}(1 + \frac{(1-w_f)\rho_f}{w_f \rho_m}) \tag{55}$$

sostituendo le equazioni appena mostrate nella *regola delle miscele corretta* otteniamo:

caso A ($w_f \leq w_{ftrans}$)

$$E_c = (\eta_o \eta_l v_f E_f + V_m E_m)(1 - v_p)^n \;\; \Rightarrow$$

$$E_c = \frac{(\eta_o \eta_l w_f \rho_m E_f + (1-w_f)\rho_f E_m)(w_f \rho_m + (1-w_f)\rho_f)^n}{(w_f \rho_m (1+\alpha_{pf}) + (1-w_f)\rho_f (1+\alpha_{pm}))^{n+1}} \tag{56}$$

Caso B ($w_f \geq w_{ftrans}$)

$$E_c = (\eta_o \eta_l v_f E_f + V_m E_m)(1 - v_p)^n \;\; \Rightarrow$$

$$E_c = \frac{(\eta_o \eta_l w_f \rho_m v_{f\,max} E_f + (1 - w_f) \rho_f v_{f\,max} E_m)(w_f \rho_m v_{f\,max} + (1 - w_f) \rho_f)^n}{(w_f \rho_m)^{n+1}} \quad (57)$$

Nei pressi della zona di transizione il modulo del composito vale invece

$$E_c = \frac{(\eta_o \eta_l v_{f\,max} (1 + \alpha_{pm}) E_f + E_m - v_{f\,max} (1 + \alpha_{pf}) E_m)(1 - v_{f\,max} + (\alpha_{pf} - \alpha_{pm}))^n}{(1 + \alpha_{pm})^{n+1}} \quad (58)$$

In figura 3.11 sono riportati gli andamenti tipici delle frazioni volumetriche nei due casi(A e B); l'andamento tipico della densità b) ;l'andamento del modulo al variare di $w_f$ c).

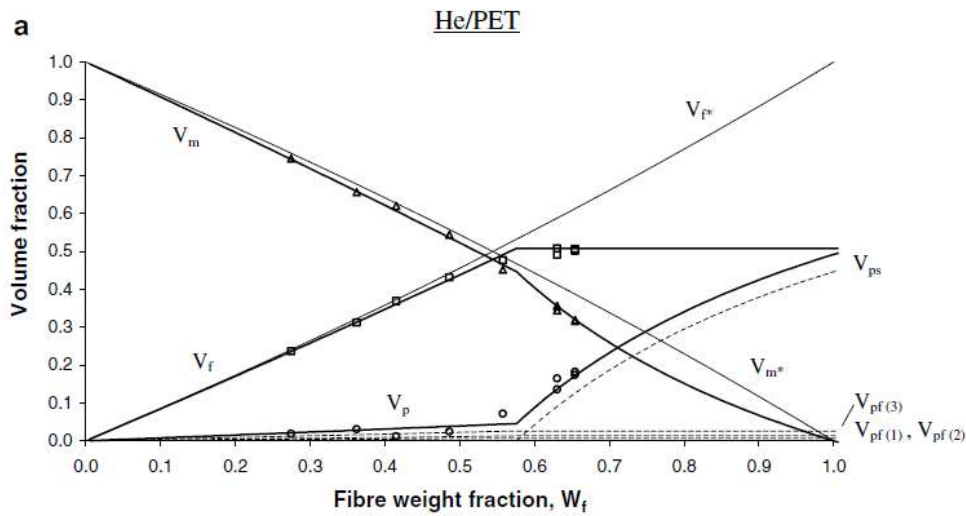
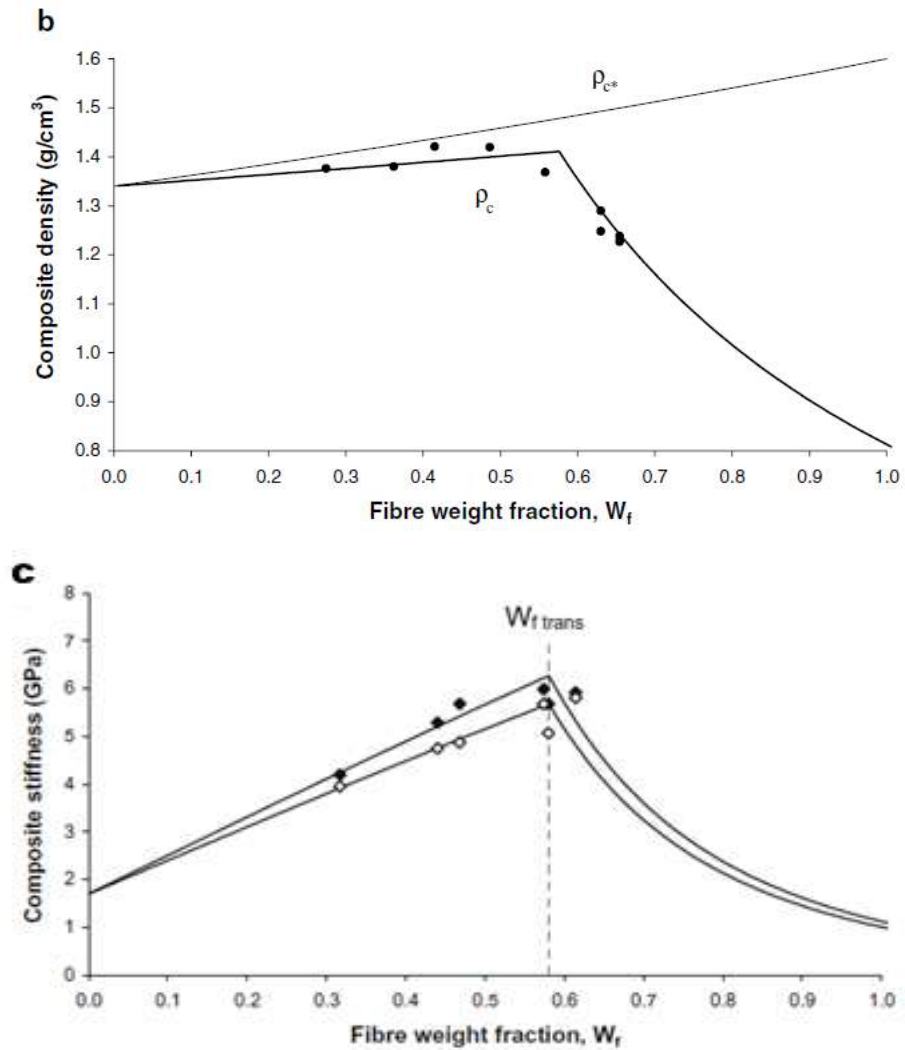



***Fig. 3.11*** *andamento dei rapporti volumetrici, densità e tensione massima al veriare della frazione volumetrica di fibra*

## 3.2.7 LA DENSITÁ DEI COMPOSITI

Il modello di Madsen offre infine la possibilità di prevedere la densità di un composito $\rho_c$, che ha un certo grado di porosità, a partire da quella dei costituenti.

$$\rho_c = \frac{W_c}{V_c} = \frac{\frac{W_f}{w_f}}{\frac{V_f}{v_f}} = \frac{v_f}{w_f}\rho_f \tag{59}$$

o in maniera equivalente

$$\rho_c = \frac{v_m}{(1-w_f)}\rho_m \tag{60}$$

sostituendo adesso le espressioni delle frazioni volumetriche viste in precedenza si ottiene per i vari casi:

- Caso A ($w_f \leq w_{ftrans}$)

$$\rho_c = \frac{\rho_m \rho_f}{w_f \rho_m (1+\sum \alpha_{pf(i)}) + (1-w_f)\rho_f (1+\sum \alpha_{pm(i)})} \quad (61)$$

- Caso B ($w_f \geq w_{ftrans}$)

$$\rho_c = \frac{v_{fmax}}{w_f} \rho_f \quad (62)$$

L' espressione per la densità del composito $\rho_{c\,trans}$ nella zona di transizione tra A e B vale

$$\rho_{c\,trans} = \frac{v_{fmax}\rho_f(1+\sum \alpha_{pm(i)}) + v_{fmax}\rho_m(1+\sum \alpha_{pf(i)}) + \rho_m}{1+\sum \alpha_{pm(i)}} \quad (63)$$

$\rho_{c\,trans}$ costituisce inoltre la massima densità ottenibile.

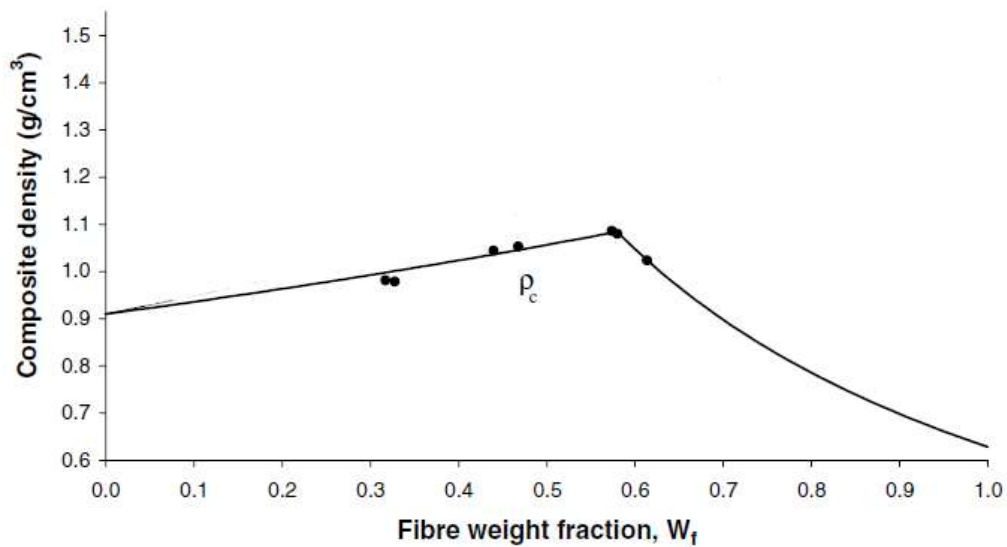



***Fig. 3.12*** *Densità in funzione della percentuale in peso di fibra*

# 3.3 LA MACROMECCANICA

Materiali con desiderate proprietà meccaniche possono essere costruiti formando strati ognuno costituito da fibre parallele tra loro e sovrapponendo gli strati stessi con le relative fibre disposte secondo orientazioni diverse. In tal caso i singoli strati si definiscono *lamine* e l'insieme delle lamine è detto *laminato*. La diversa orientazione delle fibre, come mostrato nel paragrafo dedicato ai materiali di rinforzo, può essere ottenuta nella stessa lamina facendo ricorso a tessuti di fibre disposte in due o più direzioni.

La struttura più efficiente per i compositi è naturalmente quella dove la maggior parte delle fibre si orienta secondo la direzione dei carichi primari, mentre solo il numero necessario di fibre è orientato nel verso dei carichi secondari con lo scopo principale di mantenere integra la struttura.

La possibilità quasi infinita di intervenire sulle variabili rende le strutture in materiali compositi estremamente versatili.

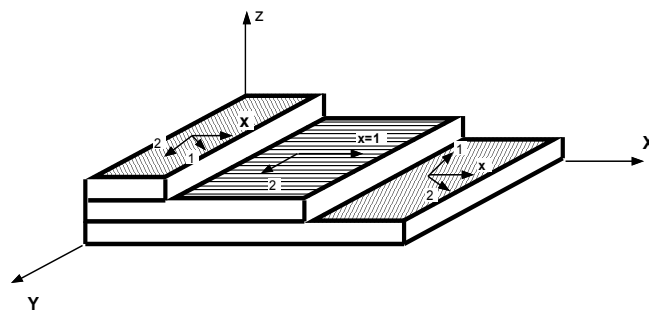



***Fig. 3.13*** *Laminato ottenuto da più lamine rinforzate con fibre continue unidirezionali*

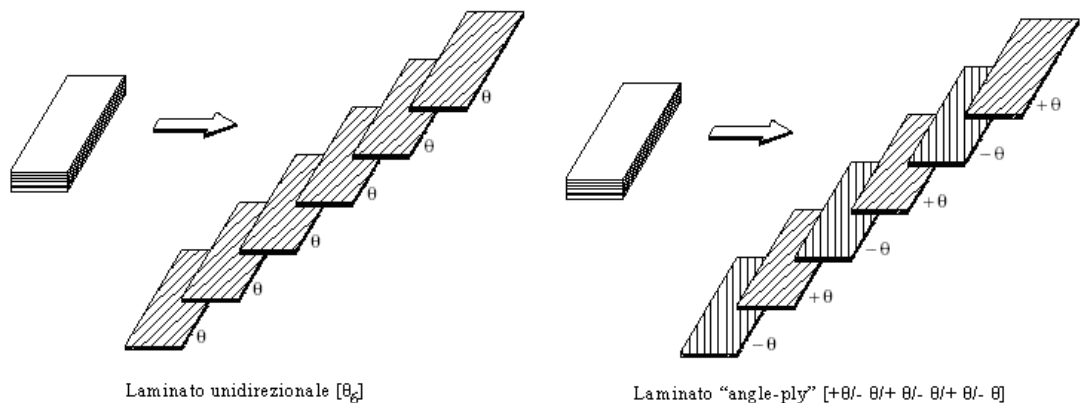
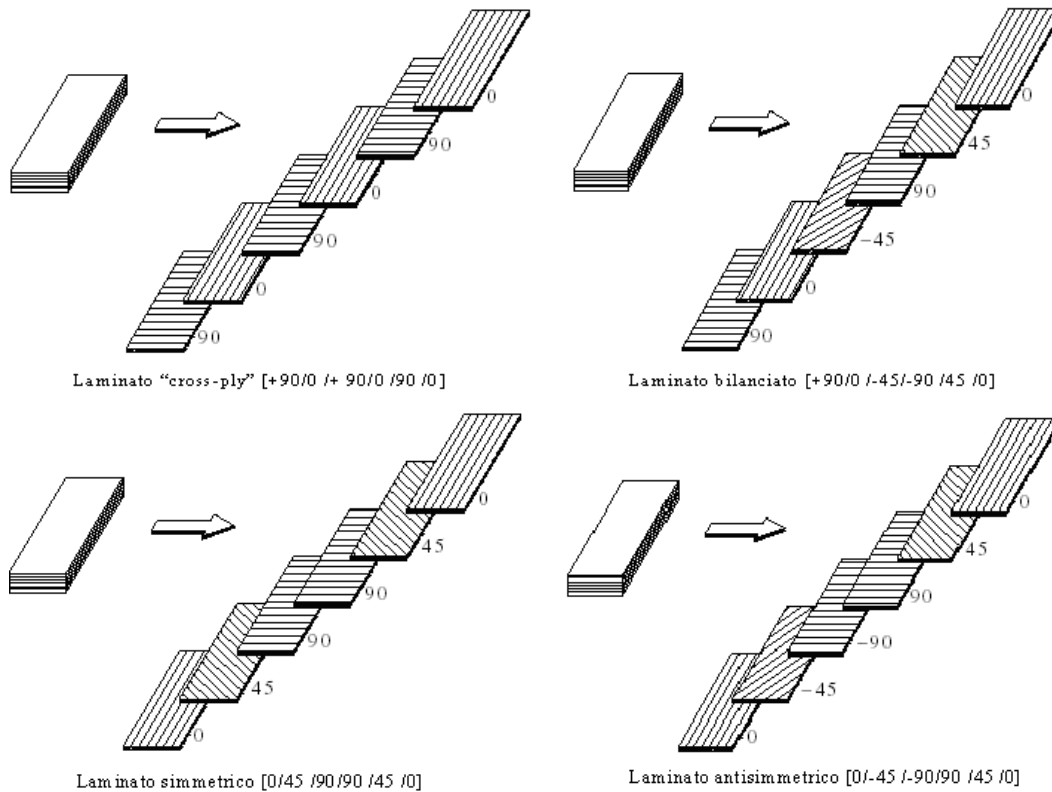



***Fig. 3.14*** *Tipologie di laminato a seconda della disposizione delle lamine*

Al livello macromeccanico, assumendo note a priori le proprietà dei singoli layer (caratteristiche delle lamine, come i moduli elastici, lo spessore, l'orientazione delle fibre, la sequenza di laminazione), può essere predetta abbastanza realisticamente la risposta meccanica globale del laminato.

La macromeccanica [1-4] è basata sulla meccanica dei continui che modella ciascuna lamina come omogenea e ortotropa, ignorando l'interfaccia tra fibre e matrice.

La Teoria Classica della Laminazione (*CLT*) è il modello matematico per predire il comportamento macromeccanico di un laminato basato su un assemblaggio arbitrario di lamine omogenee ortotropiche o trasversalmente isotropiche, come caso particolare del precedente. La modellazione 2-D è la più comune, mentre quella 3-D è molto complessa e limitata alla trattazione di alcuni problemi.

La teoria classica della laminazione permette di calcolare le tensioni e le deformazioni con alta precisione per laminati sottili eccetto che in una piccola regione in prossimità dei ponti liberi (free edges).

Se il rapporto tra larghezza e spessore del composito è meno di 20 i risultati ottenuti dalla teoria classica mostra differenze significative con la risposta reale del materiale e il modello deve essere necessariamente migliorato.

La teoria classica della laminazione si basa sulle seguenti assunzioni:

- c'è un legame monolitico di tutte le lamine , cioè non ci sono scorrimenti tra le lamine lungo la loro interfaccia;
- ciascun layer è quasi-omogeneo e ortotropico;
- le deformazioni sono continue attraverso il laminato;
- utilizzo di un modello di equazioni del primo ordine;
- tutti i layer sono in uno stato di stress piano, ossia $\sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = 0$;
- la deformazione $\varepsilon_3$ può essere trascurata rispetto alle altre due $\varepsilon_1$ , $\varepsilon_2$;
- le deformazioni di taglio trasversali $\varepsilon_4$ e $\varepsilon_5$ sono trascurabili;

Quando una forza è applicata all'estremità di un laminato, tutti gli strati si allungano della stessa quantità. Comunque, le proprietà elastiche di ciascuno strato del laminato dipendono da:

- Materiali di cui sono costituiti le fibre e la matrice
- La frazione in volume delle fibre
- L'orientazione delle fibre.

In altri termini, la rigidezza di ciascuno strato nella direzione in cui è applicata la forza è differente e poiché la tensione in un dato strato è il prodotto della rigidezza per la deformazione, la tensione in ciascun strato sarà diversa.

Poiché la forza è il prodotto della tensione per la sezione trasversale dello strato, allora la forza agente su ciascuno strato può essere determinata. La somma delle forze deve essere naturalmente pari a quella applicata al laminato multistrato.

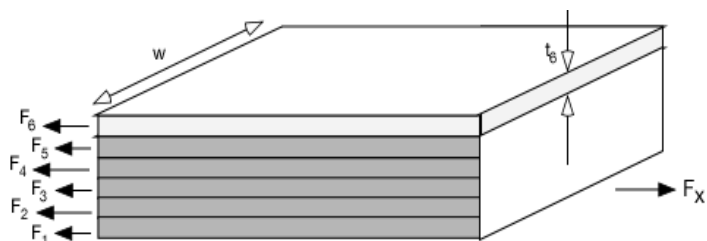



***Fig. 3.15*** *Distribuzione delle forze in un laminato*

Le forze (per unità di larghezza) e i momenti (prodotto della forza per unità di larghezza del laminato per la distanza) risultanti in ciascuna direzione e piano principale sono, in forma compatta:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} dz \tag{64}$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} z \cdot dz \tag{65}$$

dove *h* è lo spessore del laminato.

Integrando su tutto lo spessore del laminato, utilizzando la sommatoria delle forze e dei momenti, in particolare sommando le tensioni in ciascuno degli strati, si ha:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{K=1}^{n} \int_{h_k}^{h_{k+1}} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} dz \tag{66}$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^{n} \int_{h_k}^{h_{k+1}} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} z \cdot dz \tag{67}$$

Ricordando che la tensione è il prodotto della rigidezza per la deformazione, si può legare le forze risultanti N alle deformazioni e, utilizzando la matrice di rigidezza $\overline{Q}$ (costante in ciascuno strato), funzione dell'orientazione, della frazione in volume delle fibre e dei materiali di cui sono costituiti le fibre e la matrice.

Scindendo il vettore delle deformazioni, come somma di quello della linea centrale $\varepsilon^0$ e delle curvature *k*, integrando in *z* si ottiene in forma compatta una pseudo-equazione costitutiva del laminato:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{n} \overline{Q_k} \cdot \left(h_{k+1} - h_k\right) & \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n} \overline{Q_k} \cdot \left(h^2{}_{k+1} - h^2{}_k\right) \\ \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n} \overline{Q_k} \cdot \left(h^2{}_{k+1} - h^2{}_k\right) & \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{n} \overline{Q_k} \cdot \left(h^3{}_{k+1} - h3_k\right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix} \tag{68}$$

che in modo esteso è:

$$\begin{Bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{Bmatrix} \tag{69}$$

dove

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^{n} Q_{ij}^{(k)} \cdot \left( x_3^{(k)} - x_3^{(k-1)} \right) \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n} Q_{ij}^{(k)} \cdot \left( x_3^{(k)2} - x_3^{(k-1)2} \right) \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{n} Q_{ij}^{(k)} \cdot \left( x_3^{(k)3} - x_3^{(k-1)} 3 \right) \end{aligned} \tag{70}$$

La rigidezza del laminato $C_k$ è semplicemente *[A]/h* dove *h* è lo spessore totale del laminato.

## 3.3.1 I CRITERI DI ROTTURA

Le analisi di rottura per le strutture metalliche sono già state introdotte da molto tempo, mentre per quanto concerne i compositi a matrice polimerica non esistono procedure ben definite, ma sono attualmente oggetto di ricerche scientifiche intense.

Il livello di stress sopportato da un lamina dipende dal suo modulo elastico. Questo può causare grandi gradienti di tensione tra lamine che sono orientate con angoli molto differenti tra di loro (es.90°). Se il gradiente delle tensioni è vicino ad un certo limite può avvenire una frattura. Questi livelli così alti di gradiente in lamine adiacenti possono svilupparsi come risultato di carichi esterni, ma anche dalla temperatura e da gradienti di umidità.

Per i materiali compositi la rottura inizia generalmente a livello microscopico prima di poter essere osservato a livello macroscopico ed è un fenomeno piuttosto complesso, data la natura anisotropa del materiale, risultato dell'interazione di più tipologie di rottura. Il cedimento di un layer risulta in una redistribuzione delle tensioni nel laminato.

La frattura di una lamina rinforzata con fibre può essere il risultato dell'interazione di vari meccanismi di rottura che sono stati affrontati in occasione della trattazione della micromeccanica. Nel caso dei laminati esiste inoltre la *delaminazione* e consiste nella separazione dei layers tra di loro.

In un laminato, composto da più lamine, tutte queste tipologie di rottura interagiscono tra loro e, a posteriori, una volta verificata la rottura del laminato, risulta molto difficile poter individuare il fenomeno primario del cedimento. Solo seguendo l'evoluzione del cedimento con tecniche di monitoraggio come quella dell'emissione acustica, è possibile stabilire la successione dei diversi tipi di cedimento.

I criteri di rottura, puramente empirici, si pongono l'obiettivo di capire il comportamento di un materiale semplicemente a partire da un numero minimo di parametri ottenuti da test.

La trattazione inizierà prendendo in considerazione una singola lamina prima di proseguire nella trattazione dei laminati.

Nel caso di un layer sono stati ideati diversi criteri di cui i più rappresentativi e più usati sono:

- Criterio della Massima Tensione;
- Criterio della Massima Deformazione;
- Criterio di Tsai-Hill.

## 3.3.1.1 IL CRITERIO DELLA MASSIMA TENSIONE

Nella teoria della massima tensione, il cedimento avviene quando almeno una componente dello stress lungo uno degli assi principali del materiale eccede il corrispondente parametro di resistenza (carico di rottura) in quella direzione. Nel caso di sollecitazione nel piano:

$$\sigma_1 \geq R_1$$
$$\sigma_2 \geq R_2 \qquad (71)$$
$$|\tau_{12}| \geq R_{12}$$

Si nota che non c'è alcuna interazione tra i modi di rottura e che quindi questo criterio può essere suddiviso in tre sub-criteri.

Se i carichi sono noti nella direzione x che forma un angolo $\theta$ con la direzione 1 si ha:

$$\sigma_1 = \sigma_x \cos^2\theta$$
$$\sigma_2 = \sigma_x \, \mathrm{sen}^2\theta \qquad (72)$$
$$\tau_{12} = \sigma_x \, \mathrm{sen}\,\theta \cos\theta$$

e quindi la formulazione della teoria di rottura diventa:

$$\sigma_x \geq \frac{R_1}{\cos^2\theta}; \qquad \sigma_y \geq \frac{R_2}{sen^2\theta}; \qquad \tau_{xy} \geq \frac{R_{12}}{sen\theta\cos\theta} \qquad (73)$$

# 3.3.1.2 IL CRITERIO DELLA MASSIMA DEFORMAZIONE

La teoria della massima deformazione è piuttosto simile alla precedente, infatti al posto degli stress si parla di deformazioni. La lamine giunge a rottura quando almeno una delle componenti della deformazione lungo gli assi principali del materiale eccede la deformazione ultima del materiale in quella direzione.

$$\varepsilon_1 \geq A_1$$
$$\varepsilon_2 \geq A_2 \qquad (74)$$
$$|\gamma_{12}| \geq A_{12}$$

Per un composito unidirezionale soggetto a carico monoassiale in una direzione x formante un angolo $\theta$ con la direzione 1 è possibile valutare le deformazioni ammissibili considerando che in generale si ha:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1}(\sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2)$$
$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2}(\sigma_2 - \nu_{21}\sigma_1) \qquad (75)$$
$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}$$

dove sostituendo le relazioni (72) si ha:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1}\left(\cos^2\theta - \nu_{12} sen^2\theta\right)\sigma_x$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2}\left(sen^2\theta - \nu_{21}\cos^2\theta\right)\sigma_x \tag{76}$$

$$\gamma_{12} = -\frac{1}{G_{12}}\left(sen\theta\cos\theta\right)\sigma_x$$

Supponendo che il materiale abbia un comportamento lineare fino al raggiungimento della rottura, si può supporre che le deformazioni a rottura sono:

$$A_1 = \frac{R_1}{E_1}; \qquad A_2 = \frac{R_2}{E_2}; \qquad A_{12} = \frac{R_{12}}{G_{12}} \tag{77}$$

Da quanto detto si può concludere che per conoscere completamente il comportamento strutturale di una lamina ortotropa, supposto sempre che svolga la sua funzione in condizioni di stato piano di tensioni, è necessaria la conoscenza di quattro parametri elastici ($E_1$, $E_2$, $G_{12}$, $v_{12}$) e tre limiti a rottura ($R_1$, $R_2$, $R_{12}$).

### 3.3.1.3 IL CRITERIO DI TSAI-HILL

Chiamando *X* la resistenza di un composito caricato longitudinalmente alle fibre e *Y* la resistenza a trazione in direzione ortogonale, la resistenza di taglio della matrice può essere determinata usando il criterio di Tresca ed è semplicemente *Y/2*.

Quando due tensioni perpendicolari e/o uno stress di taglio è applicato al composito è necessario definire un criterio di rottura. Tsai e Hill hanno stabilito un ragionevole criterio di rottura basato sulla massima energia di deformazione, piuttosto che considerare tensione e deformazione.

L'espressione di Tsai-Hill per la massima energia di deformazione è:

$$\left(\frac{\sigma_x}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{2\tau_{xy}}{Y}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_x\sigma_y}{X^2}\right)^2 > 1 \tag{78}$$

Nel caso di stress uniassiale si può, ad esempio, avere:

- Parallelo alle fibre $\sigma_x = X$, $\sigma_y = 0$, $\tau_{xy} = 0$.
- Perpendicolare alle fibre $\sigma_x = 0$, $\sigma_y = X$, $\tau_{xy} = 0$,
- Semplice taglio $\sigma_x = 0$, $\sigma_y = 0$, $\tau_{xy} = Y/2$

Il criterio di Tsai-Hill è un criterio singolo, a differenza dei tre subcriteri in cui si possono suddividere il criterio della massima tensione e della massima deformazione. Inoltre il vantaggio è che si considera pienamente l'interazione delle tensioni e delle deformazioni.

## 3.4 IL PROGETTO DI UNA STRUTTURA SANDWICH

Nella progettazione delle strutture di tipo "sandwich" le usuali formule di scienza delle costruzioni (modello di Eulero-Bernoulli e modello di Timoshenko, più recente e complesso, in quanto, tiene conto della deformabilità al taglio degli elementi, per cui le sezioni rimangono sempre piane, ma non necessariamente ortogonali all'asse della deformata), generlamente sotto l'ipotesi di materiale omogeneo ed isotropo, risultano spesso inadeguate a prevederne sia il comportamento elastico che i carichi di rottura, a causa del ruolo fondamentale svolto dall'anima e dei particolari meccanismi di interazione fra essa e le facce.

In questo paragrafo si fa una trattazione sintetica sulla progettazione delle travi e dei pannelli, basata su quella svilupptata e contenuta nel manuale DIAB Group, reperibile gratuitamente sul portale internet della compagnia.

### 3.4.1 LE TRAVI APERTE

La trattazione della teoria delle travi sandwich comporta delle ipotesi base:

- travi sottili.
- facce sottili e dello stesso spessore
- le deformazioni di taglio e flessione nelle pelli esterne sono piccole, quindi vengono ignorate.

- in tutto lo spessore del core lo sforzo di taglio sia costante

Le convenzioni sui segni prevedono che i carichi e le deformazioni (w) si considerano positive se verso il basso in direzione dell'asse z.

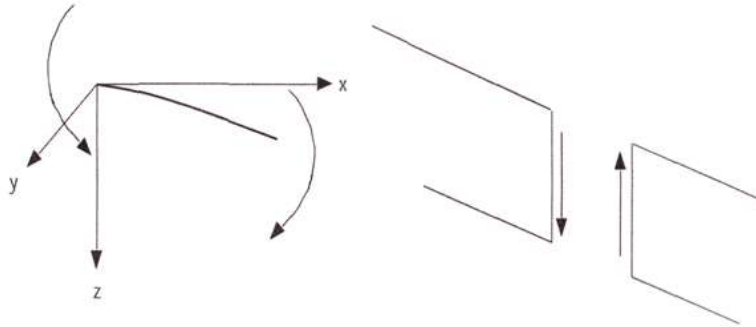



***Fig. 3.16*** *Convenzione dei segni adottata per le deformazioni, l'inclinazione, la curvatura, la flessione, il momento e le forze di taglio*

Le relazioni che seguono fanno riferimento alla figura 3.16

$$\begin{cases} \text{Deformazione o freccia} = w\,; \\ \text{Angolo di deformazione inclinazione} = +dw/dx = w'\,; \\ \text{Curvatura} = w''\,; \\ \text{Momento flettente} = -M = Dw''\,; \\ \text{Taglio} = -Q = +Dw'''; \\ \text{Carichi distribuiti} = +q = +Dw(4)\,; \end{cases} \tag{79}$$

La teoria delle travi dell'ingegneria si può adattare facilmente, con alcune modifiche, alle travi a sandwich. Nel calcolo della rigidezza flessionale dovranno essere sommati gli effetti causati dalle deformazioni di taglio del core ed alcuni termini potranno essere trascurati.

La trattazione teorica parte proprio dalla teoria delle travi ed in particolar modo dal calcolo della rigidezza flessionale, indicata con D. In una trave ordinaria, D è dato dal prodotto del modulo di elasticità E, con il momento d'inerzia dell'area I. Nelle travi a sandwich, D è la somma delle rigidezze flessionali di ogni sua parte, misurate rispetto all'asse baricentrico dell'intera sezione:

$$D = E_f \frac{bt^3}{6} + E_f \frac{btd^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12} \tag{80}$$

dove $E_f$, ed $E_c$ sono i moduli di elasticità delle facce (pedice f), e del core (pedice c).

Il primo termine dell'equazione (80) è la rigidezza flessionale locale delle facce rispetto al proprio asse baricentrico. Il secondo termine rappresenta lo spostamento del primo termine rispetto l'asse baricentrico, dell'intera sezione trasversale, per la flessione. Il terzo addendo valuta la rigidezza flessionale del core rispetto il proprio asse baricentrico, che coincide con quello dell'intera sezione trasversale.

Per gli spessori dei singoli elementi basta rifarsi alla figura seguente.

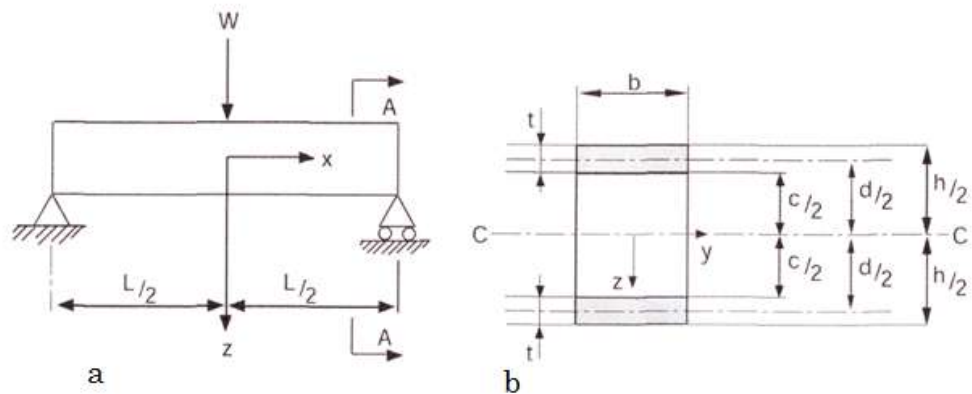



***Fig. 3.17*** *(a) dimensione della trave; (b) sezione con dimensioni*

Il primo termine equivale a meno del 1% del secondo termine quando:

$$\frac{d}{t} > 5.77 \tag{81}$$

Con un rapporto d/t > 11,55 la proporzione è minore del 0.25%, e considerando che si è assunto le facce sottili, questo termine può essere trascurato.

Il terzo termine rappresenta meno del 1% del secondo termine (e quindi può essere ignorato ) quando:

$$\frac{E_f}{E_c} \cdot \frac{td}{c^3} > 16.7 \tag{82}$$

In molte travi a sandwich reali, tali condizioni sono soddisfatte, ma, considerando le note possibilità di combinazione di materiali, questo termine deve essere controllato. Con la condizione (81) l'espressione della rigidità a flessione è:

$$D = E_f \frac{btd^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12} \tag{83}$$

Mentre, se sono soddisfatte le condizioni (82) l'espressione si riduce a:

$$D = E_f \frac{btd^2}{2} \tag{84}$$

Per quanto riguarda gli sforzi in una trave a sandwich, questi si possono determinare anche usando la teoria ingegneristica degli sforzi nelle travi, con alcune modifiche. Grazie all'ipotesi, per cui le sezioni nomali all'asse centrale rimangono piane, la deformazione in un punto che dista z dal asse baricentrico *cc* è:

$$\sigma = \frac{M_z}{\mathrm{D}} \tag{85}$$

Per ottenere lo sforzo di flessione, in un punto dato, si può moltiplicare per un modulo di elasticità appropriato. Lo sforzo sulle facce e sul core sono rispettivamente:

$$\sigma_f = \frac{Mz}{D} E_f \left(\frac{c}{2} \leq z \leq \frac{h}{2}; -\frac{h}{2} \leq z \leq -\frac{c}{2}\right) \tag{86}$$

$$\sigma_c = \frac{Mz}{D} E_c \left(-\frac{c}{2} \leq z \leq \frac{c}{2}\right) \tag{87}$$

I valori massimi di sforzo si ottengono per il valore maggiore di z dentro lo spazio della trave. Il rapporto tra la tensione massima della membrana sulle facce ed il valore massimo di tensione sul core è ( $E_f/E_c$ ) * ( h / c ).

Per dare alle travi a sandwich una forza maggiore si può scegliere una sezione scatolare. Con le facce su tutti e quattro i lati viene elevata la rigidezza al taglio e viene ridotta la deformazione di taglio, anche se non diviene trascurabile.

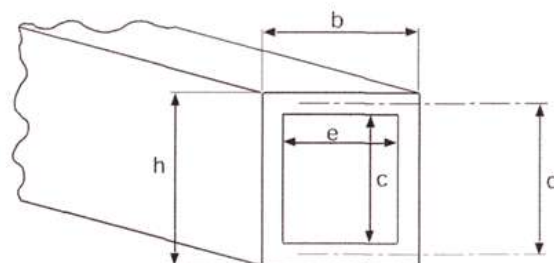



***Fig. 3.18*** *trave a sezione scatolare*

In questo caso l'espressione della rigidezza flessionale è:

$$D = E_f \frac{(bh^3 - ec^3)}{12} + E_c \frac{ec^3}{12} \tag{88}$$

Questa è la rigidezza flessionale per la flessione dell'asse baricentrico dell'intera sezione. I termini sono rispettivamente la rigidezza flessionale della scatola e del core. Il secondo termine si può trascurare se conta meno del 1% del primo.

L'espressione ordinaria per la tensione di taglio ($\tau$) è, in una trave omogenea, alla profondità z, sotto il baricentro della sezione trasversale:

$$\tau = \frac{QS}{Ib} \tag{89}$$

Q è lo sforzo di taglio sulla sezione considerata, I è il momento d'inerzia dell'intera sezione rispetto il baricentro, b è il larghezza alla distanza di $z_1$ e S è il momento statico del area della parte di sezione con $z > z_1$.

Nella seguente figura è rappresentata la distribuzione comune dello sforzo di taglio per una trave ad I.

L'equazione (88), per essere applicata ad una trave a sandwich, deve essere adattata tenendo conto dei moduli di elasticità dei vari componenti della sezione:

$$\tau = \frac{Q}{Db} \sum SE \tag{90}$$

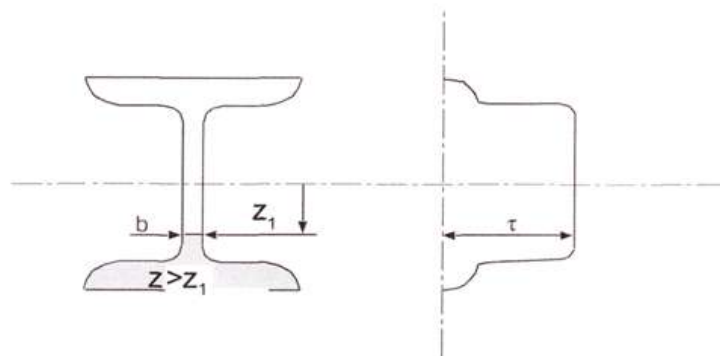



***Fig. 3.19*** *Distribuzione delle tensioni di taglio in una trave a doppia T*

D rappresenta la rigidezza flessionale dell'intera sezione e Σ( SE ) indica la somma dei prodotti di S ed E dei singoli componenti della sezione con z < $z_1$. Se si applica l'equazione (90) alla trave sandwich considerata in precedenza, per determinare la tensione a taglio, all'altezza z del core si ha:

$$\sum(SE) = E_f \frac{btd}{2} + E_c \frac{b}{2}\left(\frac{c}{2} - z\right)\left(\frac{c}{2} + z\right) \qquad (91)$$

Perciò nel core la sollecitazione di taglio vale :

$$\tau = \frac{Q}{D}\left[E_f \frac{td}{2} + E_c \frac{1}{2}\left(\frac{c^2}{4} - z^2\right)\right] \qquad (92)$$

Il valore massimo di sforzo di taglio nella zona core si ottiene inserendo il valore z = 0 nella (92).

Un espressione analoga si può ottenere per le tensioni di taglio nelle facce.

Il rapporto tra i valori massimo e minimo, che si ha per z = ±c/2, dello sforzo di taglio nel core vale:

$$\left(1 + \frac{E_c}{E_f}\frac{t}{4}\frac{c^2}{td}\right) \qquad (93)$$

Il secondo termine vale meno del 1% dell'espressione a condizione che :

$$4\frac{E_c}{E_f}\frac{t}{c}\frac{d}{c} > 100 \qquad (94)$$

Se viene soddisfatta tale condizione, lo sforzo di taglio può essere considerato costante lungo lo spessore del core. Se lo strato centrale ha valori di modulo elastico molto bassi o comunque notevolmente inferiori a quello delle pelli esterne, si può porre $E_c$ = 0 e, quindi, il valore costante dello sforzo di taglio è dato da:

$$\tau = \frac{Q}{D}E_f \frac{td}{2} \qquad (95)$$

Se, in più, sono rispettate le condizioni per cui si ottiene la (84) si ha:

$$D = E_f \frac{btd^2}{2} \tag{96}$$

In questo caso l'equazione (92) per lo sforzo di taglio nel core in questa forma:

$$\tau = \frac{Q}{db} \tag{97}$$

Per quanto concerne le deformazioni in una trave sandwich, considerando il caso semplice di una trave semplicemente appoggiata con un carico W nel punto centrale, si ha che i punti a, b, c, d ed e posti sulla mezzeria delle facce e le sezioni trasversali aa, bb, cc, etc., sono ruotate, ma rimangono comunque perpendicolari all'asse longitudinale della trave deformata. È ovvio che la faccia superiore sia compressa , mentre la faccia inferiore è caricata a trazione.

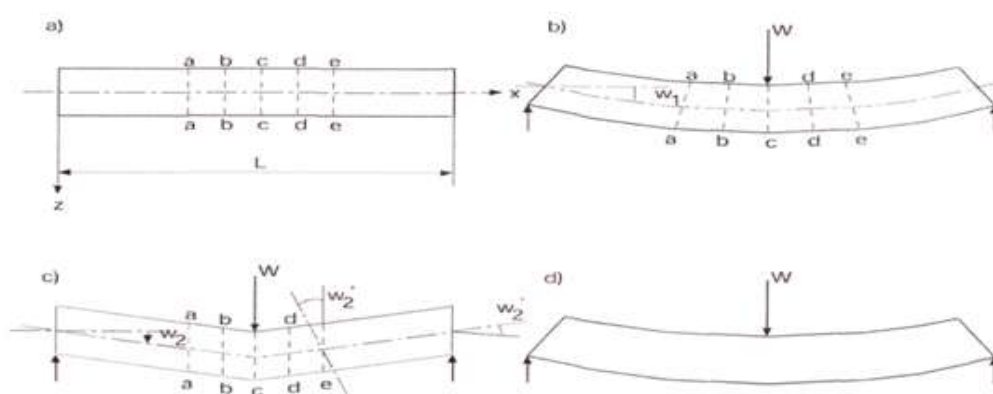



***Fig. 3.20*** *Comportamento a flessione di una trave sandwich*

Lo sforzo di taglio nel core ad una certa sezione è τ = Q/db. Questa si associa con la deformazione di taglio ϒ = Q/Gbd che, come τ, si considera costante attraverso lo spessore del core; G è il modulo di taglio del materiale del core. Questa deformazione di taglio porta un tipo nuovo di deformazione illustrata nella figura 3.20c In sostanza, i punti a, b, c, d,e, non si muovono orizzontalmente, ma in direzione verticale $w_2$ a causa della deformazione di taglio. Nella figura 3.21 si possono osservare le facce e la linea di mezzeria longitudinale della trave inclinata ed il rapporto tra la curvatura della trave, $dw_2/dx$, e la deformazione di taglio del core ϒ. In questa stessa figura, che mostra la deformazione di una piccola parte del

sandwich, la distanza de è uguale a $d(dw_2/dx)$. Che è uguale anche a cf che a sua volta è uguale a Y*c.

Quindi:

$$\frac{dw_2}{dx} = \gamma \frac{c}{d} = \frac{Q}{Gdb}\frac{c}{d} = \frac{Q}{AG}\frac{c}{d} \tag{98}$$

Considerato che le facce sono state ipotizzate sottili, c coincide quasi con d e ciò significa che $w_2' = \Upsilon$ e

$$w_2' = \frac{Q}{AG} = \frac{Q}{V} \tag{99}$$

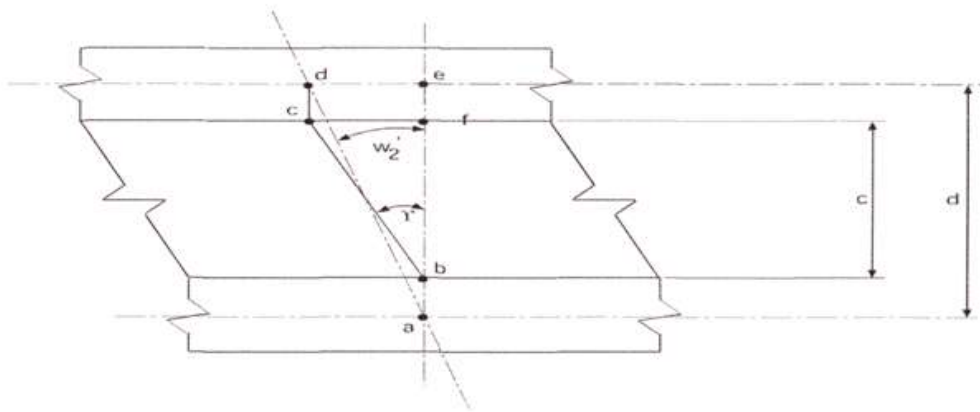



***Fig. 3.21*** *Deformazione di taglio della trave*

Il prodotto V=AG contiene un fattore chiamato β che per sezione rettangolare vale 1. La deformazione $w_2$, associata alla deformazione di taglio nel core, si può ottenere in alcuni problemi particolari dall'integrazione dell'equazione (98).

Per esempio, in una trave semplicemente appoggiata, con un carico W nel punto centrale, la reazione vincolare Q, agli appoggi è +W/2. L'integrazione dell'equazione (98) con Q=+W/2 fornisce la deformazione: $w_2 = \frac{W}{2V} = \frac{W}{2V}\,\mathrm{x} + \mathrm{cost}$, $0 \le x \le L/2$. Poiché $w_2 = 0$, per x = 0 la costante diventa trascurabile. Il valore maggiore di $w_2$ si ha nel centro della trave, per x = L/2 ed è pari a:

$$\Delta_2 = \frac{WL}{4V} \tag{100}$$

La deformazione centrale totale Δ è dato dalla sovrapposizione dello spostamento di flessione $\Delta_1$, con lo spostamento $\Delta_2$:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{WL^3}{48D} + \frac{WL}{4V} \quad (101)$$

In generale, lo spostamento di travi sandwich caricate simmetricamente, con un core antiplane (è un concetto idealizzato di core, in cui $\sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} = 0$, ossia $E_c = 0$, ma il taglio in direzione perpendicolare al piano non è nullo) a facce sottili, si può trovare similmente, sovrapponendo le flessioni e le deformazioni di taglio $w_1$ e $w_2$. Le deformazioni di flessione si trovano col metodo usuale, mentre quella di taglio integrando l'equazione (98). Considerando la (99), in generale, se questa viene integrata luungo la trave per ottenere la freccia, l'equazione risulatante si può scrivere nel seguente modo:

$$w_2 = \frac{M}{V} + costante \quad (102)$$

Dall'espressione si evince che il diagramma dello spostamento dovuto al taglio è lo stesso di quello dovuto al momento flettente, con l'applicazione di un fattore 1/V.

Per esempio una trave semplicemente appoggiata di campata L, caricata con un carico uniformemente distribuito q, ha una deformazione centrale di flessione $\Delta_1$, uguale a $+5qL^4/384D$. Poiché il momento flettente al centro è $+qL^2/8$, la deformazione di taglio centrale $\Delta_2$ è quindi $+qL^2/8V$. La deformazione totale $\Delta$ al centro è data da:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{5qL^4}{384D} + \frac{qL^2}{8V} \quad (103)$$

Allo stesso modo si ottengono le espressioni per la deformazione totale per gli altri casi. Per situazioni di carico differenti si possono usare le tabelle notevoli, inserendo, quinid, i valori effettivi di Q nella (98) ed usando le condizioni al contorno per integrare tutte le espressioni.

La trattazione fin qui svolta è valida nel caso di applicazione di carichi simmetrici e che tutti i punti della linea mediana si muovano solo in verticale. In generale, questa rappresenta una limitazione, in quanto nelle condizioni reali e per carichi generalmente asimmetrici le facce potrebbero scorrere orizzontalmente tra di loro, determinando uno spostamento dei

punti appartenenti ad una sezione trasversale in quiete nel modo illustrato nella seguente figura.

In tale la faccia superiore si trova spostata alla sinistra, così che punti c,d,e,f ora appaiono nelle nuove posizioni c',d',e',f'. L'angolo cbc' viene denotato da $\Upsilon_0$ ed esistono le relazioni seguenti: c· f = c'· f – c'· c = ($\Upsilon$ - $\Upsilon_0$)· c = d· e = $w_2$'· d .

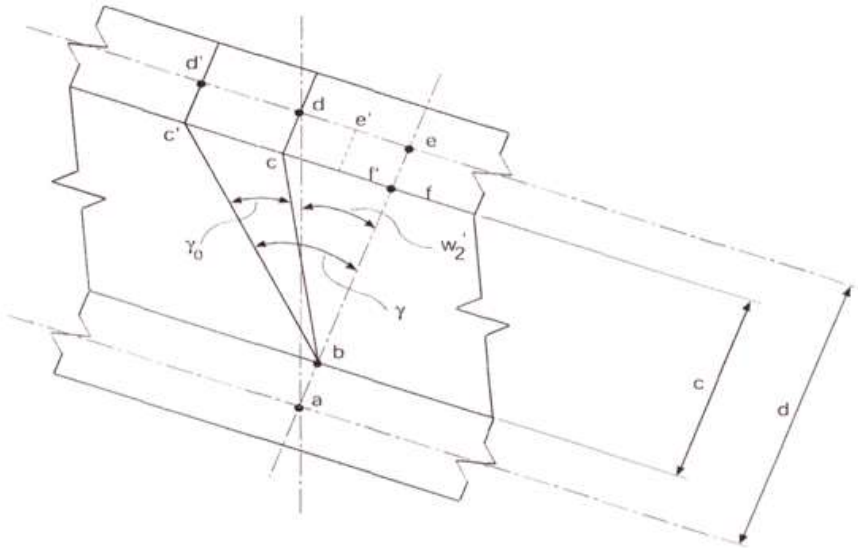



***Fig. 3.22*** *L'effetto di $Y_0$ sulla deformazione di taglio*

Quindi:

$$w_2' = (\gamma - \gamma_0)\frac{c}{d} \tag{104}$$

$$w_2' = \frac{Q}{AG} - \gamma_0\frac{c}{d} \tag{105}$$

$$w_2 = \frac{M}{AG} - \gamma_0 x\frac{c}{d} + costante \tag{106}$$

Le equazioni (99) e (102) sono semplicemente dei casi particolari delle (105) e (106).

Nel caso in cui una trave o un puntone sia soggetto a sforzi assiali, l'analisi standard ha mostrato che le instabilità appaiono quando il carico assiale P raggiunge il valore del carico di Eulero $P_E$, ossia il limite oltre il quale il puntone non ritorna in condizioni rettilinee, dopo la cessazione del carico.

Nel caso di un puntone a sandwich le deformazioni di taglio che si verificano riducono la rigidezza del puntone ed il carico d'ingobbamento è minore del corrispondete carico di Eulero, nella sua generale espressione:

$$P_{\mathrm{E}} = \frac{\pi^2 \mathrm{D}}{(\beta \mathrm{l})^2} \tag{107}$$

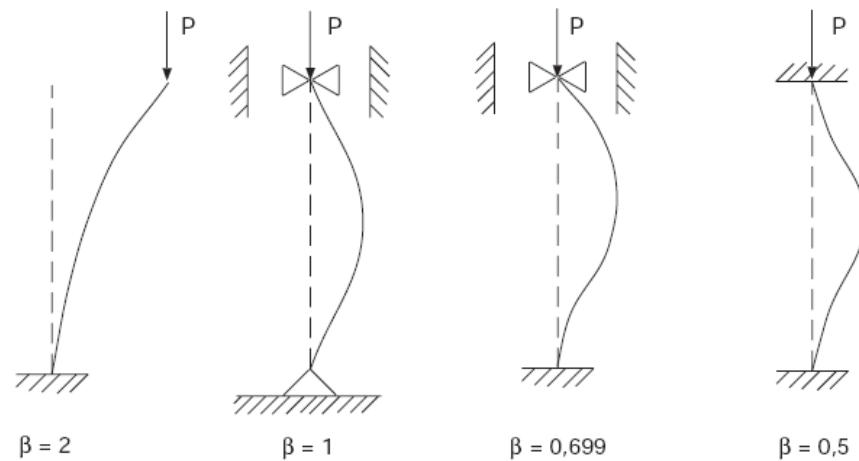



***Fig. 3.23*** *Il carico euleriano al variare dei casi*

Consideriamo un puntone a sandwich incastrato verticalmente. Quando la spinta assiale P raggiunge un valore critico $P_{cr}$, lo spostamento consiste in due spostamenti sovrapposti: $w_1$, spostamento di flessione, e $w_2$, spostamento associato alla deformazione di taglio del core. Ad una sezione x il momento flettente M è:

$$M = P(w_1 + w_2) = -D_1 w_1'' \tag{108}$$

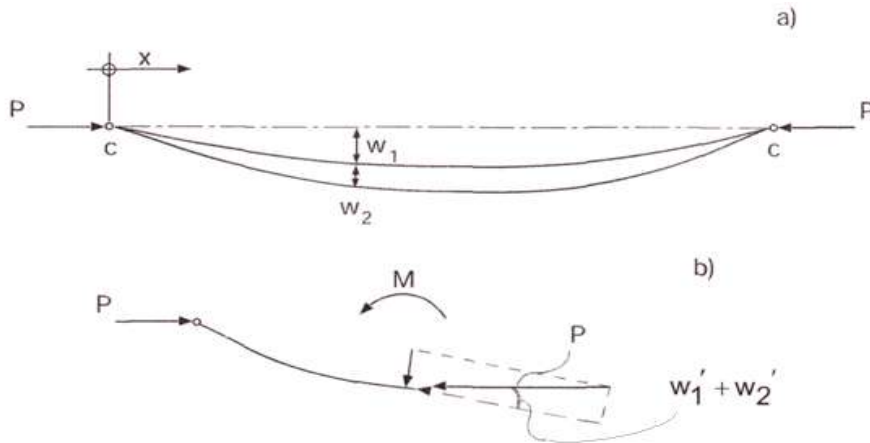



***Fig. 3.24*** *Ingobbamento del puntone incernierato alle estremità*

La figura 3.24 mostra che P ha una componente P( $w_1$' + $w_2$' ) che agisce perpendicolarmente all'asse del puntone.

Effettuando le dovute operazioni e posizioni si ottiene che

$$P_E = \frac{\pi^2 D_1}{L^2} \tag{109}$$

e il carico critico, $P_{cr}$, del puntone a sandwich è:

$$\frac{1}{P_{cr}} = \frac{1}{P_E} + \frac{1}{V} \tag{110}$$

con V = AG.

Si possono presentare tre casi:

- Quando G è finito, $P_{cr}$ è minore del carico di Eulero
- Quando G è infinito, $P_{cr}$ è uguale al carico di Eulero
- Quando G è piccolo, $P_{cr}$ approssima il valore di AG.

Questa formula può essere utilizzata in ogni caso con l'inserimento dei carichi di Eulero relativi.

Una trave si considera stretta quando la larghezza b è minore dello spessore del core c. E' questa l'ipotesi che è stata adottata alla base della trattazione fin qui svolta. In tale circostanza la contrazione o l'espansione laterale delle facce, nella direzione y, associata alla tensione della membrana in direzione x, può avvenire liberamente, senza causare grandi deformazioni di taglio nel core lungo il piano yz. Le tensioni sulle facce sono quindi, principalmente, in una direzione ed il rapporto tensione deformazione è uguale ad E.

Non si applica la stessa conclusione alle tensioni di flessione nelle facce. Ogni faccia è una lastra sottile ed il rapporto tra tensione e deformazione è rigorosamente $E/(1-v^2)$. Comunque, queste deformazioni e tensioni, sono di importanza secondaria e sembra ragionevole considerare solo E, tutto al fine di evitare complicazioni.

Una trave si considera larga quando la larghezza b è molto maggiore dello spessore del core c. In questo caso, a differenza del precedente, le contrazioni e le espansioni laterali delle facce sono contrastate nella direzione dall'impossibilità del core a sopportare una deformazione di taglio indefinitamente grande nel piano yz. In questo caso è ragionevole assumere che la deformazione nella direzione y sia zero. Inoltre, il rapporto tra tensione e deformazione, in direzione x deve essere assunta pari $E/(1-v^2)$. Questo valore deve essere usato al posto di E in tutte le equazioni fin qui analizzate.

Se, invece, anche in presenza di una trave larga, questa può curvarsi liberamente nel piano yz, per esempio, se gli è permesso sollevarsi dagli appoggi, allora E deve essere preferito a $E/(1-v^2)$.

Se le facce non sono dello stesso materiale o sono di spessore diverso, l'equazioni principali delle travi rimangono inalterate a condizione che la rigidezza flessionale venga scritta come segue:

$$D = \frac{bd^2 E_1 E_2 t_1 t_2}{E_1 t_1 + E_2 t_2} + \frac{b}{12} \cdot (E_1 t_1^3 + E_2 t_2^3) \qquad (111)$$

Dove i pedici 1 e 2 si riferiscono alla faccia superiore ed inferiore rispettivamente. Qui si è assunto che il contributo del core alla rigidezza flessionale sia trascurabile, sotto le condizioni viste in precedenza.

È utile notare che l'equazione per lo sforzo di taglio nel core rimane inalterata.

Quando il modulo elastico del core $E_c$ non è trascurabile rispetto a quello delle pelli esterne, bisogna fare alcune modifiche per usare le relazioni fin qui prese in considerazione. Per esempio l'espressione che permette di calcolare la rigidezza flessionale D deve essere usata integralmente. Inoltre, la tensione di taglio $\tau$ e la deformazione di taglio ϒ, non possono più essere considerati costanti lungo lo spessore del core.

Nella figura seguente si riporta un piccolo tratto di una trave a sandwich che sopporta una deformazione di taglio del core. La sezione ACB si deforma nella curva A'CB'. Il punto rappresentativo p si muove a distanza u alla destra. In p la deformazione è Y= du/dz, quindi l'espressione della tensione $\tau$ è:

$$\tau = G\frac{du}{dz} \tag{112}$$

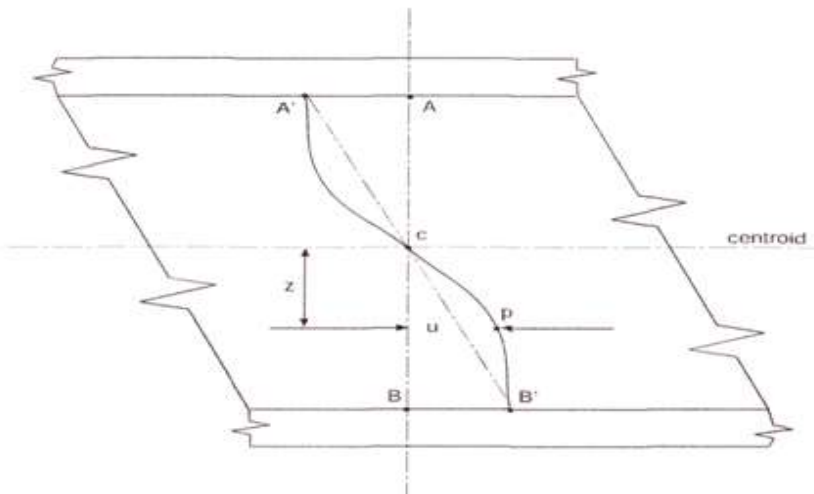



***Fig. 3.25*** *Defromazione di taglio in una trave con core rigido*

L'equazione (92) e (112) si possono combinare ed integrare, ottenendo l'espressione per u vale:

$$u = \frac{Q}{GD}\left[\frac{E_f tdz}{2} + \frac{E_c}{2}\left(\frac{c^2 z}{4} - \frac{z^3}{3}\right)\right] \tag{113}$$

Per esempio lo spostamento AA' e BB'si ottiene scrivendo z = ±c/2.

$$BB' = \frac{Q}{GD}\left(\frac{E_f tdc}{4} + \frac{E_c c^3}{24}\right) \tag{114}$$

Il massimo di sforzo di taglio si ottiene in z = 0 nell'equazione (92).

$$\tau_{max} = \frac{Q}{D}\left(\frac{E_f td}{2} + \frac{E_c c^2}{8}\right) \tag{115}$$

Ora si supponga di sostituire il core reale con uno *antiplane* ( $\sigma_x=\sigma_y=\tau_{xy}=0$ ) con un modulo di taglio G', differente da $G_x$, ma che conserva la rigidezza flessionale D precedente. Il valore di G' è scelto in modo che la sezione ABC si deformi dalla linea dritta in A'CB'. Poiché il core è antiplane , $E_c$ scompare e lo spostamento orizzontale diventa:

$$BB' = \frac{Q}{G'D}\left(\frac{E_f tdc}{4}\right) \tag{116}$$

Poiché G è stato scelto in modo che le equazioni 112 e 114 diano lo stesso risultato per BB', il core antiplane è esattamente equivalente ad un core reale, ciò ci permette l'utilizzo dell'analisi fatta per le travi a sandwich. Questa analisi tratta solo con gli spostamenti core-bordo AA', BB' e non dipende dalla forma della sezione deformata A'CB'. Quindi il core antiplane equivalente ha il modulo di taglio come questo:

$$G' = \frac{G}{1 + \frac{E_c}{6E_f} \cdot \frac{c^2}{t(c+t)}} \tag{117}$$

Per applicare le procedure fin qui analizzate per le travi sandwich, in ogni espressione di calcolo di D, G deve essere rimpiazzato da G'.

## 3.4.2 I PANNELLI PIANI

### 3.4.2.1 PANNELLI CON FACCE UGUALI APPOGGIATI SU DUE LATI

Per i pannelli, con facce uguali e sottili, appoggiati su due lati opposti, la teoria e le formule sono le stesse di quelle per le travi aperte, a condizione che il carico sia una pressione uniforme. Comunque si deve notare che i pannelli si considerano come travi larghe, con le stesse ipotesi e possibilità di semplificazione. Perciò nell'analisi E si può rimpiazzare con $E/(1-v^2)$.

### 3.4.2.2PANNELLI CON FACCE UGUALI APPOGGIATI SU QUATTRO LATI

Per ottenere delle formule efficienti si applica il metodo energetico ai pannelli appoggiati su tutti e quattro i lati.

Il metodo permette di trovare un'espressione per l'energia potenziale totale del materiale come funzione dello spostamento assunto. L'energia consiste di due parti principali: l'energia di deformazione U, dovuta alla deformazione dei materiali delle facce e del core, e l'energia potenziale H, dovuta allo spostamento del carico che si ha quando si deforma il pannello. Il metodo si basa inoltre sul fatto che l'energia totale (U+H) ha un minimo quando il pannello spostato è in equilibrio. Di conseguenza l'energia totale (U+H) deve essere minimizzata rispetto alla deformazione di flessione e taglio per trovare il carico critico, tensioni e deformazioni.

La linea centrale AG e quella normale AE sono ruotate entrambe di un angolo ðw/ ðx. Poiché, nella deformazione di taglio, la linea AF viene ruotata di un angolo piccolo λðw/ ðx, dove λ può assumere ogni valore tra 1 e 0. Da ciò si ottiene la deformazione di taglio nella sezione (l'angolo EAF). Per λ = 1 il pannello ha rigidezza al taglio, per λ = 0 non ha alcuna resistenza al taglio.

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x}(1 - \lambda) \quad (118)$$

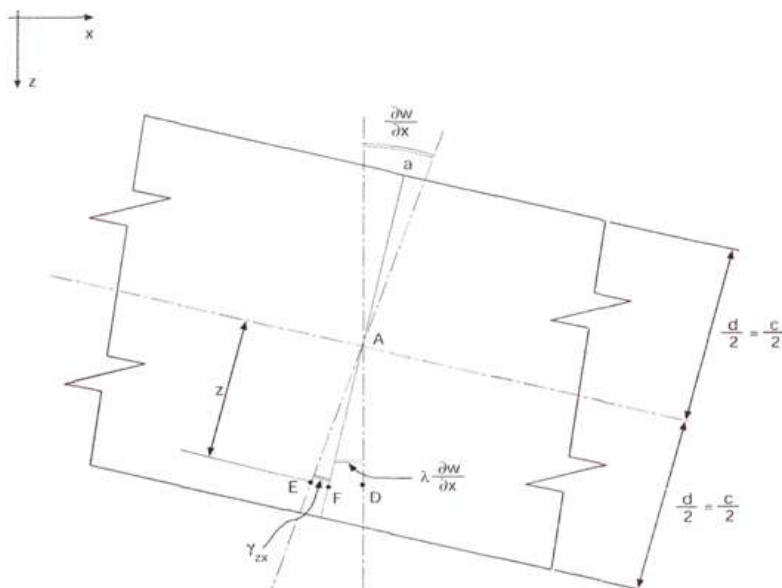



***Fig. 3.26*** *Sezione di un pannello sandwich in flessione nel piano zx*

Poichè le deformazioni si considerano piccole, gli spostamenti nella direzione x sono:

$$u = -z\lambda \frac{\partial w}{\partial x} \tag{119}$$

Allo stesso modo:

$$\gamma_{yz} = (1 - \mu) \frac{\partial w}{\partial y} \tag{120}$$

$$v = -z\mu \frac{\partial w}{\partial y} \tag{121}$$

dove il termine μ è il corrispondente di λ e v è lo spostamento nella direzione y.

Le deformazioni nelle direzioni x ed y sono date dagli spostamenti:

$$e_x = \frac{\partial u}{\partial x} = -z\lambda \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \tag{122}$$

$$e_y = \frac{\partial v}{\partial x} = -z\mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \tag{123}$$

La deformazione di taglio nel piano xy vale:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = -z(\lambda - \mu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \, \partial y} \tag{124}$$

con λ e μ parametri indipendenti da x ed y.

Dall'equazione dell'energia totale, mediante alcune posizioni e operazioni si giunge alle espressioni che permettono di determinare tensioni, deformazioni e abbassamenti in un pannello sandwich.

Nel caso di carico distribuito uniforme su tutto il pannello, si ottengono le seguenti formule pratiche di immediato utilizzo e di interesse ingegneristico in fase di progettazione:

1) Abbassamento massimo:

$$w_{max} = \frac{q\mathrm{b}^4}{D_2}\sum\sum[\beta_1 + \rho\beta_2] \tag{125}$$

con:

$$\beta_1 = \frac{16}{\pi^6}\sum\sum\left[\frac{(-1)^{\frac{m-1}{2}}(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{nm\Omega^2}\right] \qquad m, n\ dispari$$

$$\beta_2 = \frac{16}{\pi^6}\sum\sum\left[\frac{(-1)^{\frac{m-1}{2}}(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{nm\Omega}\right] \qquad m, n\ dispari$$

Per un più immediato utilizzo i valori possono essere ricavati dal seguente diagramma:

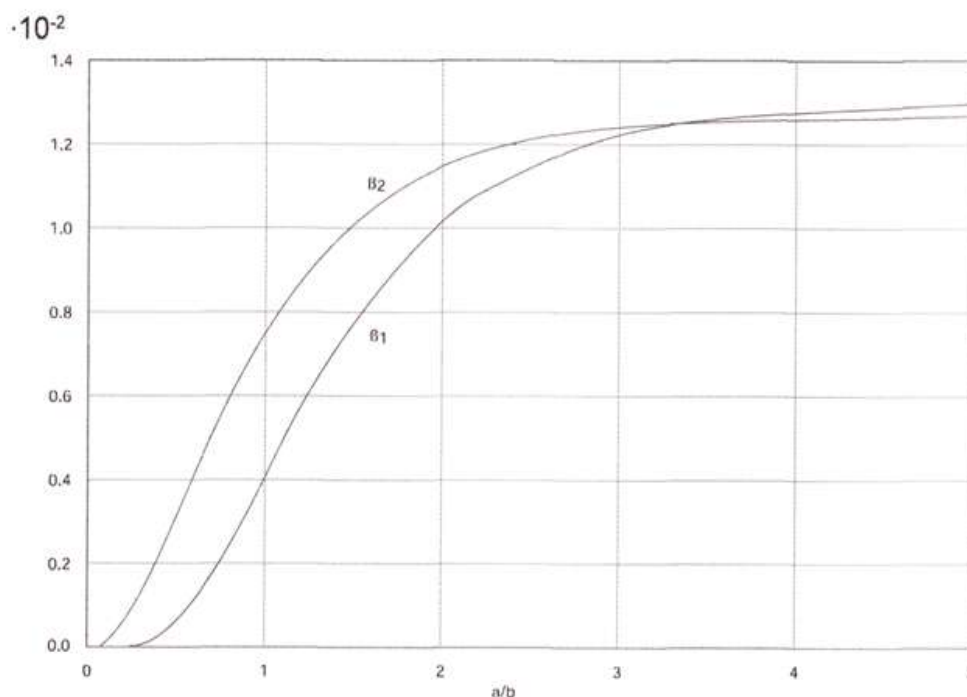



***Fig. 3.27*** *Coefficienti $\beta_1$ e $\beta_2$. Per un sandwich isotropico,con le facce sottili, semplicemente appoggiato*

2) Tensioni:

Si può dimostrare che la tensione normale sulle facce ha un massimo al centro del pannello (x = a/2, y = b/2). Lo sforzo di taglio sulle facce è più elevato all'angolo (x = 0, y = 0), lo sforzo di taglio nel core $\tau_{xz}$ è più alto in mezzeria dei lati di lunghezza b (x = 0, y = b/2) e lo sforzo di taglio nel core $\tau_{yz}$ è più alto nel mezzo dei lati di lunghezza a (x = a/2, y = 0). I risultati possono essere elencati come segue:

$$\sigma_x = \frac{qb^2}{td}\left(\beta_3 + \nu_f \beta_4\right) \tag{126}$$

$$\sigma_y = \frac{qb^2}{td}\left(\beta_4 + \nu_f \beta_3\right) \tag{127}$$

$$\tau_{xy} = \frac{qb^2}{td}\left(1 - \nu_f\right)\beta_5 \tag{128}$$

$$\tau_{xz} = \frac{qb}{d}\beta_6 \tag{129}$$

$$\tau_{yz} = \frac{qb}{d}\beta_7 \tag{130}$$

Dove

$$\beta_3 = \frac{16}{\pi^4}\sum\sum \frac{(-1)^{\frac{m-1}{2}}(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{\Omega^2} \cdot \frac{m}{n} \cdot \frac{b^2}{a^2} \tag{131}$$

$$\beta_4 = \frac{16}{\pi^4}\sum\sum \frac{(-1)^{\frac{m-1}{2}}(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{\Omega^2} \cdot \frac{m}{n} \tag{132}$$

$$\beta_5 = \frac{16}{\pi^4}\sum\sum \frac{b}{a\Omega^2} \tag{133}$$

$$\beta_6 = \frac{16}{\pi^3}\sum\sum \frac{(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n\Omega} \frac{b}{a} \tag{134}$$

$$\beta_7 = \frac{16}{\pi^3} \sum \sum \frac{(-1)^{\frac{m-1}{2}}}{m\Omega} \tag{135}$$

Per un più immediato utilizzo i valori possono essere ricavati dai seguenti diagrammi:

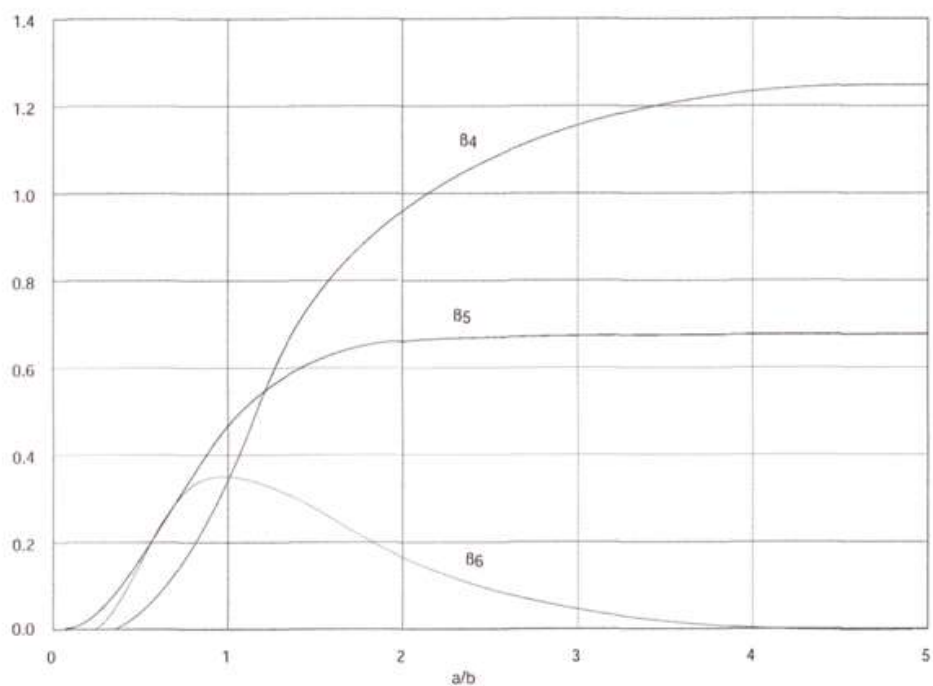



***Fig. 3.28*** *Coefficienti $\beta_3$ e $\beta_5$. Per un sandwich isotropico,con le facce sottili, semplicemente appoggiato*

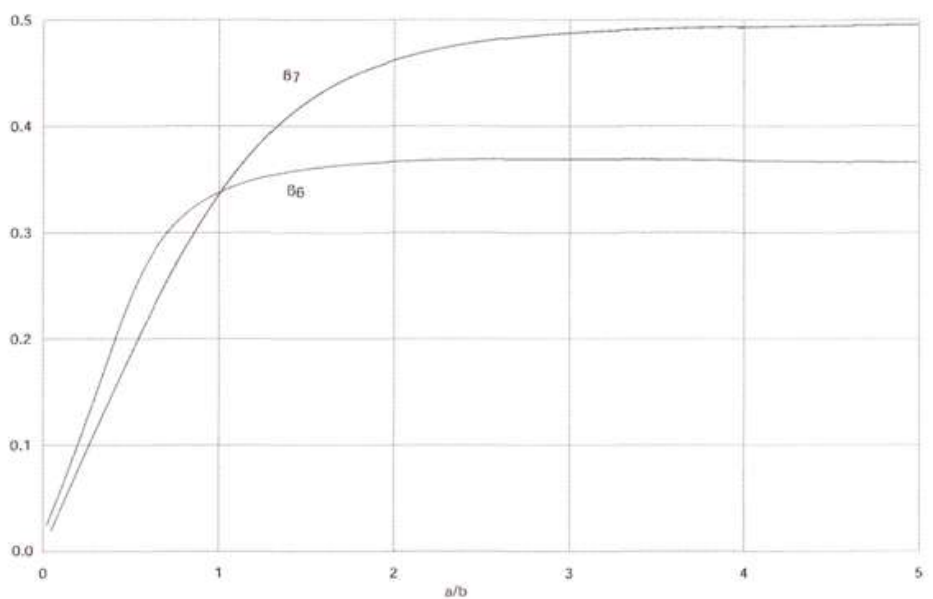



***Fig. 3.29*** *Coefficienti $\beta_6$ e $\beta_7$. Per un sandwich isotropico,con le facce sottili, semplicemente appoggiato*

Se il pannello sandwich è soggetto al solo carico assiale, si pone il problema di determinare se tale carico sia superiore a quello critico, ossia se può causare l'ingobbamento dell'intero pannello

$P_{xmn}$ si definisce come il carico critico sul bordo per unita di lunghezza, che causa l'ingobbamento negli (m, n)esimi modi. Per ogni m assegnato il valore minimo di carico critico si ottiene per n = 1.

$$P_{xmn} = \frac{\pi^2 D_2}{b^2} K_1 \tag{136}$$

in cui:

$$K_1 = \frac{\left[\left(\frac{mb}{a}\right) + \frac{\mathrm{a}}{\mathrm{mb}}\right]^2}{1 + \rho\left[\left(\frac{\mathrm{mb}}{\mathrm{a}}\right)^2 + 1\right]} \tag{137}$$

con ρ che è un parametro adimensionale calcolato come:

$$\rho = \frac{\Pi^2}{2g} \frac{E}{G} \frac{td}{b^2} \tag{138}$$

mentre $D_2$ è la rigidezza flessionale del sandwich:

$$D_2 = \frac{E_f t \mathrm{d}^2}{2g} = \frac{E_f t \mathrm{d}^2}{2(1 - \nu^2)} \tag{139}$$

Le seguenti figure mostrano i valore che $K_1$ può assumere in funzione di a/b per quattro differenti modi m = 1,…,4, e quattro valori differenti di ρ ( 0; 0.1; 0.2; e 0.4 ). Poiché è di ineteresse solo il valore minomo di $K_1$, vengono usati solo gli inviluppi minori di $K_1$ per m = 1,…,4. Così la figura mostra solo quattro curve ( m=1,…,4 ) in cui si deve notare che quando a/b >>1 l'inviluppo minore delle curva divienetende ad essere una linea orizzontale. I diagrammi sono validi per 0 < a/b < 3.5 e per valori più alti si possono usare i valori più bassi.

In sostanza per determinare il carico critico, si può ricavare $K_1$ dal diagramma appropriato ed inserirne il valore nell'equazione per determinare il carico d'ingobbamento.

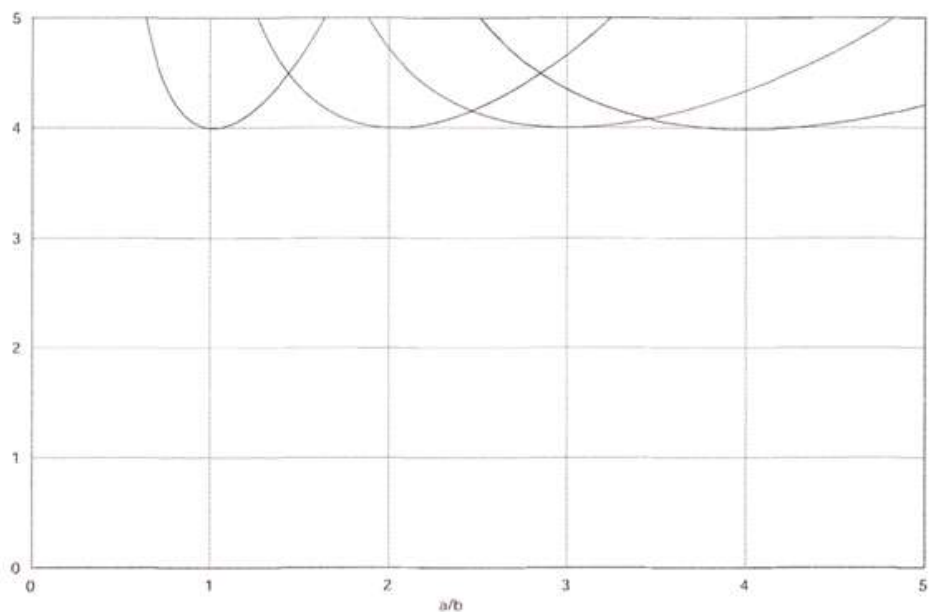



***Fig. 3.30*** *Coefficiente di ingobbamento K1 tracciato rispetto a a/b per m=[1;4], e ρ=0, per un sandwich isotropico, con le facce sottili, semplicemente appoggiato*

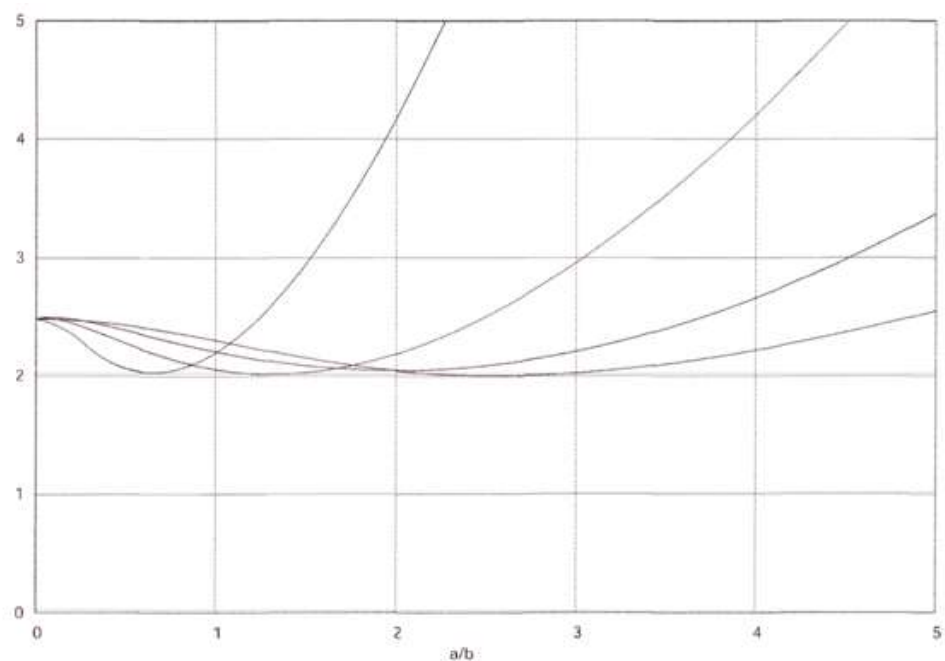



***Fig. 3.31*** *Coefficiente di ingobbamento K1 tracciato rispetto a a/b per m=[1;4], e ρ=0.1, per un sandwich isotropico, con le facce sottili, semplicemente appoggiato*

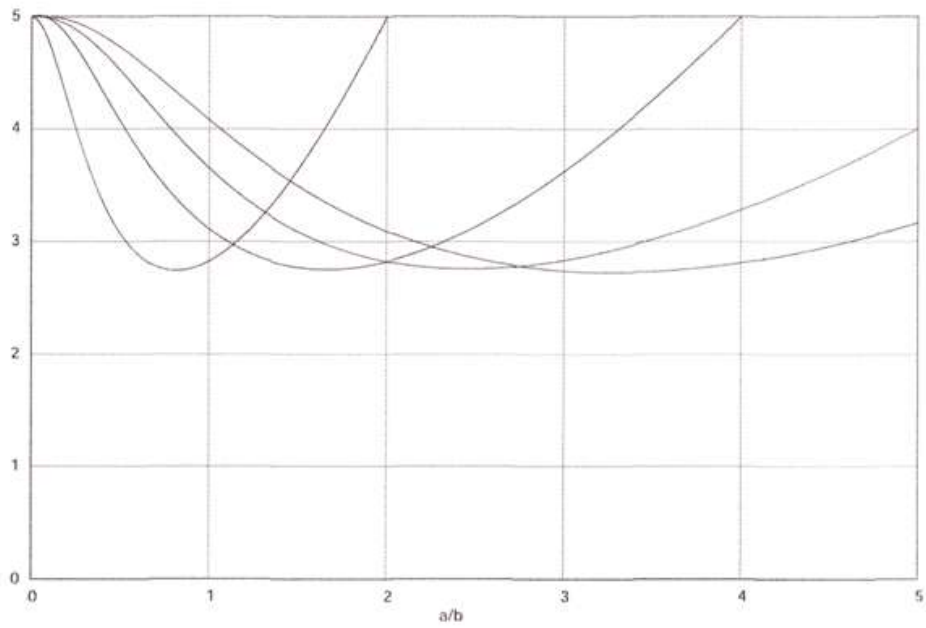



***Fig. 3.32*** *Coefficiente di ingobbamento K1 tracciato rispetto a a/b per m=[1;4], e ρ=0.2, per un sandwich isotropico, con le facce sottili, semplicemente appoggiato*

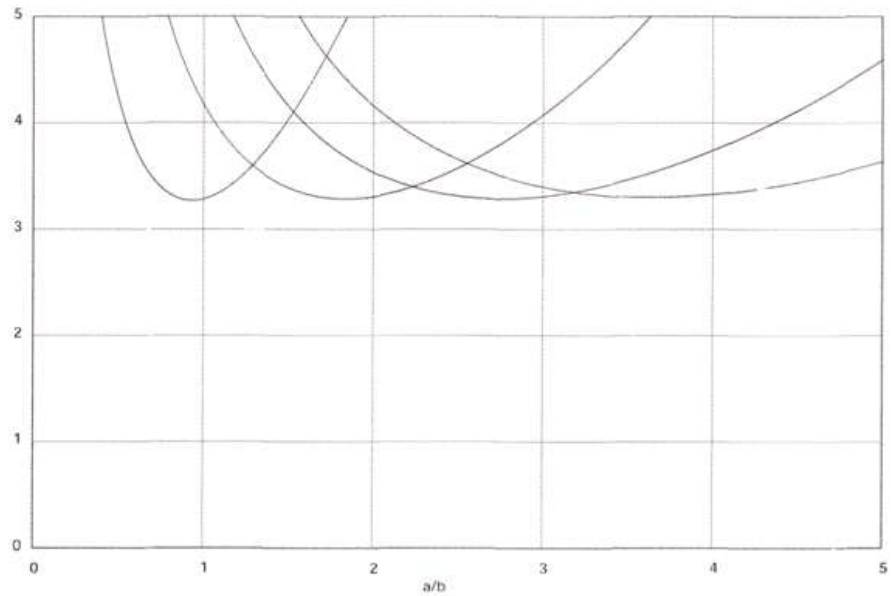



***Fig. 3.33*** *Coefficiente di ingobbamento K1 tracciato rispetto a a/b per m=[1;4], e ρ=0.4, per un sandwich isotropico, con le facce sottili, semplicemente appoggiato*

Nel caso in cui, il carico distribuito agisce in concomitanza con il carico assiale, si può dimostrare che le relazioni valide per il solo carico distribuito sono valide a condizione che ogni termine delle serie per il calcolo delle funzioni β venga moltiplicato per un fattore $(1-P/P_{xmn})^{-1}$ .

Quando i pannelli hanno facce di spessore differente o sono di diverso materiale, bisogna fare alcune modifiche. L'equazioni per l'ingobbamento e la flessione , non cambiano, valutando se entrambe le facce presentano lo stesso modulo di Poisson $v_f$, e si devono adottare i cambiamenti seguenti:

$$D_2 = \frac{E_1 E_2 t_1 t_2 d^2}{\left(1 - \nu_f^2\right) \cdot (E_1 t_1 + E_2 t_2)} \tag{140}$$

$$\rho = \frac{\pi^2}{b^2\left(1 - \nu_f^2\right)} \cdot \frac{E_1 E_2 t_1 t_2 c}{G(E_1 t_1 + E_2 t_2)} \tag{141}$$

#### 3.4.2.3 ALCUNE PECULIARITÁ NELLA PROGETTAZIONE

Nella progettazione dei pannelli , le maggiori difficoltà si incontrano nel progetto delle giunzioni e delle aperture. È importante valutare attentamente la giunzione ad altri membri caricati nel rispetto dei vincoli di deflessione, vagliare le alternative tra i metodi di giunzione in termini di peso e di costo, valutare gli spazi per gli ispessimenti ed allargamenti per l'uso di bulloni, chiodi od incollaggi. Inoltre, le possibili concentrazioni di stress, quando si uniscono elementi con viti, passanti o mordenti, può determinare la necessità di inserire dei rinforzi localizzati, altrimenti l'anima potrebbe schiacciarsi per la pressione concentrata nel serraggio del bullone o non offrire una buona presa alle viti mordenti.

Occorre infine non dimenticare che quando si usano materiali differenti vi sono carichi termici anche residui e quindi vanno studiate le curve stress-strain dei diversi materiali

#### 3.4.2.4 MODALITÁ DI COLLASSO

Data la particolare natura multistrato e multimateriale della struttura sandwich, le possibili cause di cedimento sono diverse e molteplici e possono interessare le pelli, l'anima oppure la struttura completa. In funzione della geometria, delle proprietà dei materiali utilizzati e delle condizioni di carico, alcuni modi di cedimento saranno più critici di altri, limitando le prestazioni e la capacità portante della struttura.

Tra le principali e più frequenti modalità di cedimento è opportuno ricordare almeno le seguenti, suddivise in due tipi:

- Instabilità generale, ovvero cedimenti che riguardano tutto il sandwich
- Instabilità locale, in cui a cedere è solo uno dei componenti.

L'instabilità generale riguarda l'insufficiente spessore del pannello o la rigidezza del core e lo "shear crimpling", dovuta ad un modulo a taglio del core troppo basso o una bassa resistenza, sempre a taglio, dell' adesivo.

L'instabilità locale considera:

- rottura delle pelli (per trazione o compressione);

***Fig. 3.34*** *Rottura delle facce o face yeld (instabilità locale)*

- rottura a taglio trasversale: per un insufficiente resistenza a taglio dell'anima;

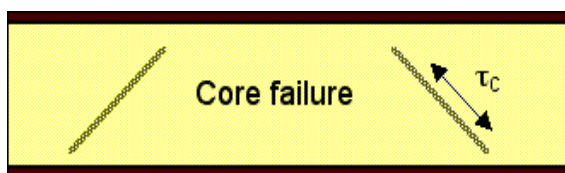



***Fig. 3.35*** *Instabilità globale dovuta alla scarsa resistenza del core a taglio o a compressione/trazione*

-instabilità locale delle pelli: "intracell buckling"(o dimpling). Causata da facce troppo sottili o in caso di core a nido d'ape, celle troppo grandi; si può propagare come "face wrinkling". In questo caso le pareti delle celle fanno da nodi, mentre le facce si in stabilizzano verso l'interno, o l'esterno. L'incollaggio tra faccia e nido d'ape non cede almeno che non degeneri in un "face wrinkling";

- "face wrinkling": la faccia si deforma come una piastra su di una fondazione elastica, si verifica quando la tensione normale di compressione della trave raggiunge il livello di instabilità. Tale

instabilità è causata dalla ondulazione intrinseca presente su strutture con core a nido d'ape od ondulati; al crescere del carico l'ondulazione cresce fino a degenerare nella instabilità.

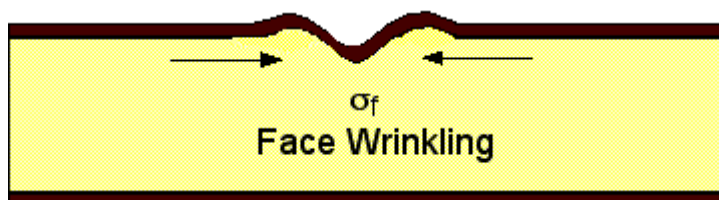



***Fig. 3.36*** *Corrugamento delle facce*

Il face wrinkling può essere un problema ad alte temperature quando le proprietà degli adesivi, che oggi hanno buona resistenza a compressione, si degradano.

- indentazione: cioè lo sfondamento locale dell'anima, può essere dovuto all'applicazione di carichi elevati su aree troppo ristrette del pannello.

- delaminazione all'interfaccia pelle-anima o in corrispondenza di inserti.

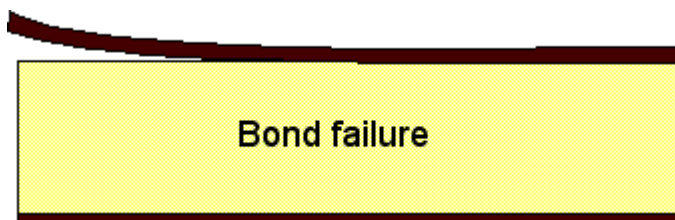



***Fig. 3.37*** *Distacco delle facce, delaminazione*

-schiacciamento locale del core: dovuto alla bassa resistenza dello stesso a compressione

Per ognuna delle modalità di cedimento citate sono disponibili adeguati criteri di resistenza, con formulazioni più o meno complesse, in grado di fornire una previsione delle condizioni tensionali critiche per l'attivazione del modo di cedimento considerato. Questi valori critici andranno in seguito confrontati con le condizioni tensionali presenti nella struttura per effetto dei carichi esterni applicati.

Per poter descrivere in maniera esatta la deformabilità e lo stato di tensione di una struttura complessa, quale un pannello sandwich e soprattutto per poter considerare gli effetti locali, (carichi concentrati, inserti, interfacce anima-pelli), è necessario utilizzare modelli analitici sofisticati oppure analisi numeriche ad elementi finiti.

È, inoltre, importante ricordare che, in condizioni di esercizio, le strutture sono normalmente soggette a carichi variabili nel tempo e quindi a sollecitazioni di fatica. In fase di analisi delle diverse modalità di cedimento, risulta quindi necessario considerare opportunamente la ciclicità dei carichi applicati e non solamente i loro effetti statici.

La resistenza meccanica di un componente strutturale è in generale influenzata dalla presenza di difetti, la quale determina una riduzione, più o meno evidente, delle proprietà strutturali del componente, tra cui il limite di fatica.

Nelle strutture sandwich difetti tipici, come la mancanza di adesione all'interfaccia lamina-nucleo o danneggiamenti del nucleo stesso, possono essere causati dal processo di fabbricazione, da impatti o da altri eventi accidentali. Stabilire la riduzione di durata a fatica, dovuta alla presenza di un difetto, è un problema molto complesso. In generale, per assicurare il più possibile il mantenimento delle condizioni iniziali, si possono evidenziare alcune cause di deterioramento che possono portare alla nascita di difetti.

Uno dei problemi più gravi ed anche più difficili da debellare per i sandwich è l'accumulo di fluidi nel core. L'accumulo di acqua può causare danni gravi al pannello sia in caso di congelamento, sia, nel caso di aerei supersonici ad alta quota, di ebollizione che può provocare la distruzione della struttura; la corrosione dovuta all'acqua può intaccare e sciogliere l'adesivo che unisce le facce al core. Il fluido nel core, inoltre, fa aumentare il peso della struttura e può provocare problemi di sbilanciamento dinamico nelle superfici di controllo e nelle pale dei rotori di elicottero. Negli aeromobili l'umidità entra nelle strutture durante il servizio in fase di discesa, quando la differenza di pressione tra interno ed esterno è favorevole, anche se può essere già presente perché intrappolata al momento della fabbricazione

## 3.5 INDAGINI PRELIMINARI PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETÁ DI BASE DEI MATERIALI COMPOSITI

### 3.5.1 PROVA DI TRAZIONE

La prova di trazione (tensile test) [94-96] consiste nel sottoporre un provino ad una deformazione a velocità costante, mediante l'azione di un carico di trazione unidirezionale F (load) applicato ortogonalmente alla sezione del provino.

Le prove di trazione si basano, quindi, su delle ipotesi:

- spostamento quasi statico;
- costanza della sezione durante la prova;
- distribuzione assiale dei carichi

Durante la prova si misura il valore del carico e la lunghezza del provino rispettivamente tramite una cella di carico e un estensimetro.

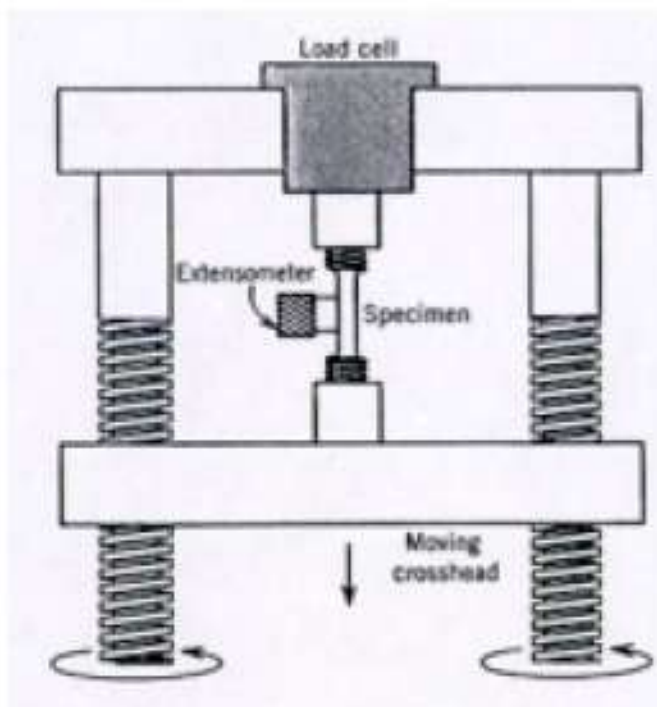



***Fig. 3.38*** *Schema di una macchina di trazione*

I risultati potrebbero essere riportati in un diagramma carico lunghezza ma in tal modo sarebbero influenzati, ad esempio, dal diametro del provino. E più logico far si che i valori di un test siano indipendenti dalla geometria del provino ma validi per qualsiasi forma o dimensione; per questo si preferiscono misurare durante la prova lo sforzo σ (o stress o engineering stress) e la deformazione ε (o engineering strain o strain) definibili rispettivamente come:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (142)$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l} \quad (143)$$

in cui $A_0$ è l'area della sezione del provino prima del test, $l_0$ è la lunghezza iniziale del provino e l quella durante la prova dopo che il carico F è stato applicato.

In tal modo si ottengono dei valori che vengono riportati nel diagramma sforzi-deformazioni (stress-strain curve).

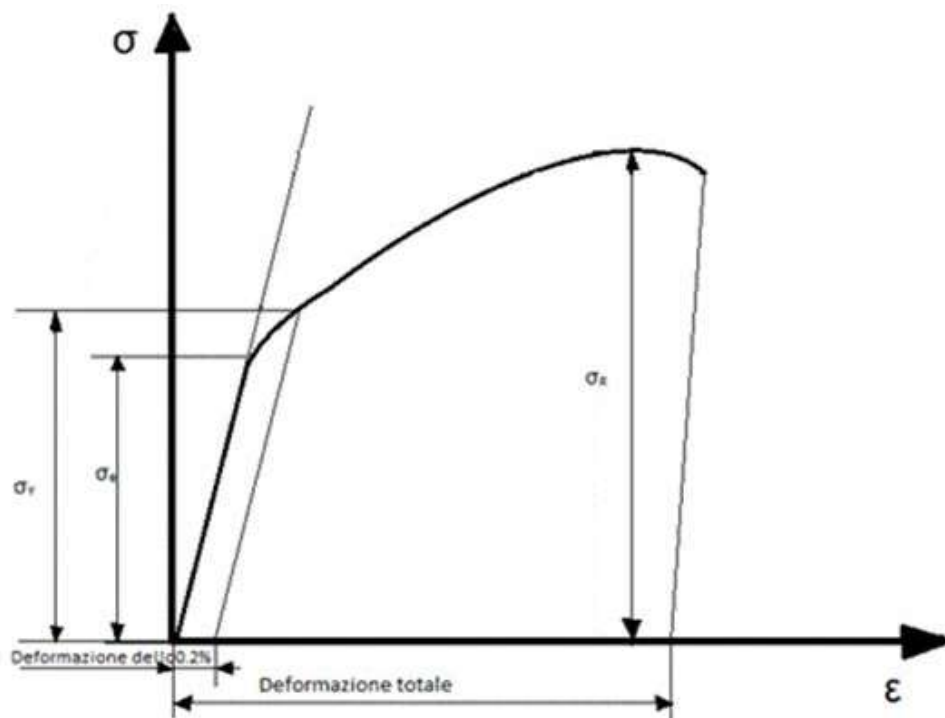



***Fig. 3.39*** *Diagramma sforzi-deformazione*

Inizialmente, quando il carico ha un valore basso, il materiale si allunga elasticamente ovvero può riprendere la sua lunghezza originaria se il carico torna a zero: la curva segue, infatti, un andamento lineare rappresentato dalla legge di Hooke

$$\sigma = E\varepsilon \tag{144}$$

in cui la costante di proporzionalità E è il modulo d'elasticità o di Young.

I valori di σ che descrivono il tratto iniziale rettilineo, la cui pendenza è data da E, definiscono il campo elastico. Se la rottura avviene in campo elastico si parla di materiale fragile.

Alcuni materiali (ad esempio la ghisa grigia) presentano un andamento non lineare nella parte elastica della curva stress-strain; in questi casi E non è determinabile come scritto in precedenza ma si considera il modulo d'elasticità tangente o secante definiti rispettivamente come la pendenza della retta tangente alla curva ad uno specifico valore di ε o come la pendenza della retta secante la curva in uno specifico valore di ε e passante per l'origine.

Sopra un certo valore di σ la deformazione aumenta: se questa rimane anche in piccola parte quando il carico è stato tolto, il materiale ha subito una deformazione permanente e si è entrati nel campo plastico; carichi più elevati conducono poi alla rottura del materiale. In campo plastico si dice che il materiale si è *incrudito*, o comunque si realizzano delle deformazioni macroscopiche (plastiche) che, a differenza di quelle elastiche, permangon per effetto della riorganizzazione delle strutture microscopiche interne del materiale, con vari scorrimenti ed adattamenti, che avvengono ben prima che si mostrino ad occhio nudo, ma che si manifestano con un incremento di temperatura del materiale durante la prova.

Il limite di snervamento $\sigma_y$ (yield strength) è lo stress al quale si passa dal campo elastico a quello plastico che generalmente coincide con il limite di proporzionalità in cui la curva smette di seguire un andamento lineare. Spesso però questo limite non è determinabile con esattezza e allora si assume come $\sigma_y$ quello che comporta una deformazione plastica dello 0,2% (offset yield strength o proof strength): esso viene determinato portando la parallela al tratto elastico iniziale della curva, in corrispondenza del valore ε= 0,002 e vedendo a quale valore dello stress corrisponde l'intersezione di tale retta con la curva. Il valore del limite di snervamento

così ottenuto è un limite convenzionale perché spesso si è già nel campo plastico.

Per quei materiali che non hanno un tratto elastico della curva σ- ε, il calcolo di questo limite fittizio non è possibile e, in genere, si assume come limite di snervamento lo stress necessario a produrre un certo strain (ad esempio ε= 0,005).

La curva sforzi-deformazioni [1-4] per certi acciai a basso contenuto di carbonio può presentare un doppio limite di snervamento: ciò accade poiché il materiale dovrebbe iniziare a deformarsi plasticamente allo stress $\sigma_1$ ma, in realtà, piccoli atomi interstiziali raggruppati attorno alle dislocazioni interferiscono con il loro movimento (che fa segnare l'inizio della deformazione plastica) il quale comincia solo ad un valore $\sigma_2$ detto limite di snervamento superiore (upper yield point). Solo dopo che si è raggiunto tale limite, le dislocazioni si muovono e l'allungamento del campione può avvenire sotto uno stress che può anche diminuire fino al valore $\sigma_1$ detto limite di snervamento inferiore (lower yield point). Da notare che nel tratto tra Z e $\sigma_2$, il comportamento è elastico ma non più proporzionale (vale a dire non segue la legge di Hooke).

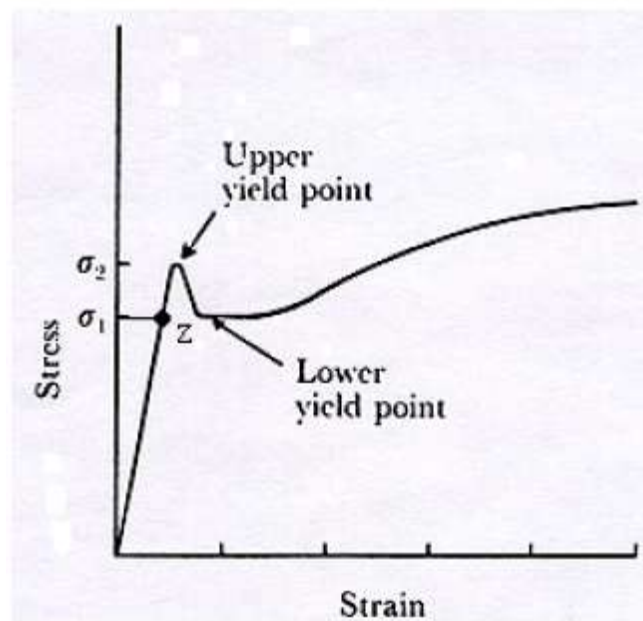



***Fig. 3.40*** *Diagramma sforzi-deformazione per un materiale duttile*

Dopo $\sigma_y$ si ha l'inizio di una deformazione plastica: tuttavia inizialmente questa deformazione è uniforme, ossia l'allungamento interessa tutta la lunghezza del provino e contemporaneamente si ha un'uniforme

diminuzione della sezione (incrudimento). Il materiale diventa più resistente, lo stress necessario per deformarlo cresce fino ad un valore massimo $\sigma_t$ (tensile strength) preso come misura della resistenza a trazione. Nello stesso punto in cui si raggiunge $\sigma_t$ avviene simultaneamente la strizione (necking), cioè l' allungamento successivo sarà localizzato in una zona precisa del provino (neck) che porterà ad una riduzione locale dell'area della sezione.

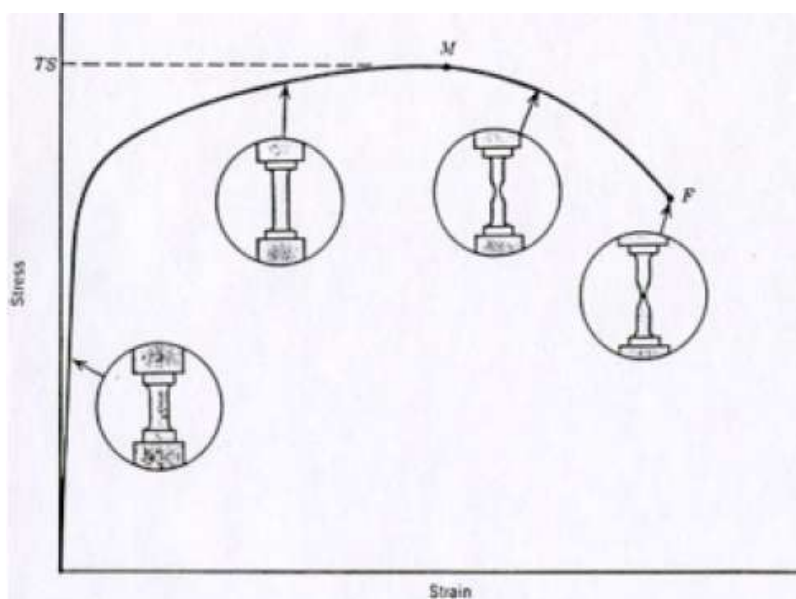



***Fig. 3.41*** *Strizione di un provino duttile*

Dopo il fenomeno di strizione si produrrà una cricca che, propagandosi velocemente, porterà il provino alla rottura in corrispondenza al raggiungimento dello stress di rottura $\sigma_r$.

Ovviamente materiali diversi risponderanno con comportamento differente ad una prova di trazione sicché si otterranno curve stress-strain diverse.

I polimeri sono costituiti da lunghe catene aggrovigliate d'unità base dette monomeri (che sono molecole più o meno semplici) ripetute all'infinito.

Un elastomero è un materiale che può essere allungato fino ad almeno due volte la sua lunghezza originaria, anche con bassi stress, e una volta rilasciato torna alle dimensioni iniziali. In base a questa definizione i polimeri possono distinguersi in gomme (che sono materiali elastomerici) o in plastiche (che sono materiali più rigidi).

Quando una gomma viene sottoposta a trazione, le catene di molecole cominciano ad allungarsi e a districarsi in direzione dello sforzo, e il

materiale si fa più rigido a causa delle aumentate forze attrattive tra le molecole; quando lo sforzo cessa, le catene ritornano al loro stato originario.

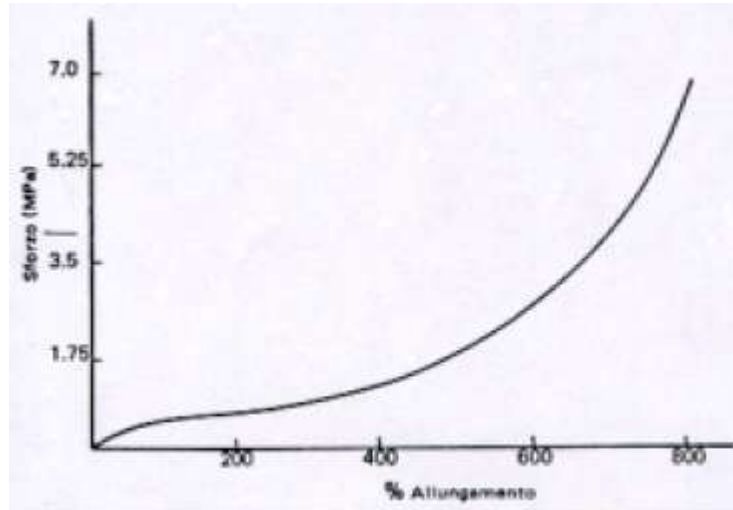



***Fig. 3.42*** *Curva sforzo-deformazione per una gomma*

In fig.3.42 è rappresentata la curva sforzo-deformazioni per una gomma, da cui si deduce che questa non obbedisce alla legge Hooke, ha un modulo di Young basso e la resistenza a trazione può andare da 7 MPa a circa 20 MPa poco prima di rompersi.

Si possono tracciare anche curve sforzo-deformazioni per una prova a compressione: nel caso della gomma (fig.3.43) una compressione causa all'inizio un più efficiente riempimento dello spazio del materiale; al diminuire dello spazio disponibile, aumenta la resistenza ad un'ulteriore compressione finché cominciano a reagire alla tensione applicata dei legami primari nelle catene. Aumenta così la pendenza della curva all'aumentare della deformazione stessa in compressione.

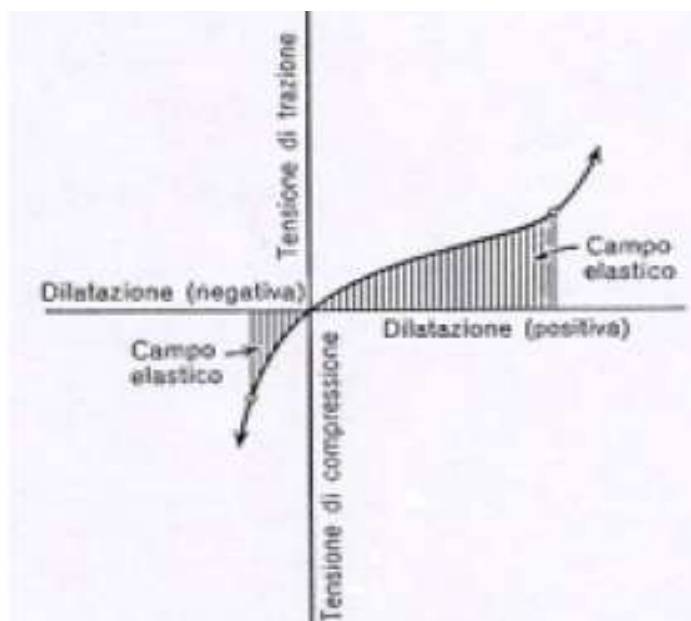



***Fig. 3.43*** *Curva sforzo-deformazione a compressione*

I materiali polimerici possono dividersi in tre gruppi in base alla loro curva stress-strain (Fig.3.44):

- polimeri fragili (curva A) i quali si rompono mentre si deformano elasticamente;
- polimeri plastici (curva B) in cui la deformazione iniziale elastica è seguita da snervamento e deformazione plastica;
- polimeri elastici (curva C) i quali sono degli elastomeri;

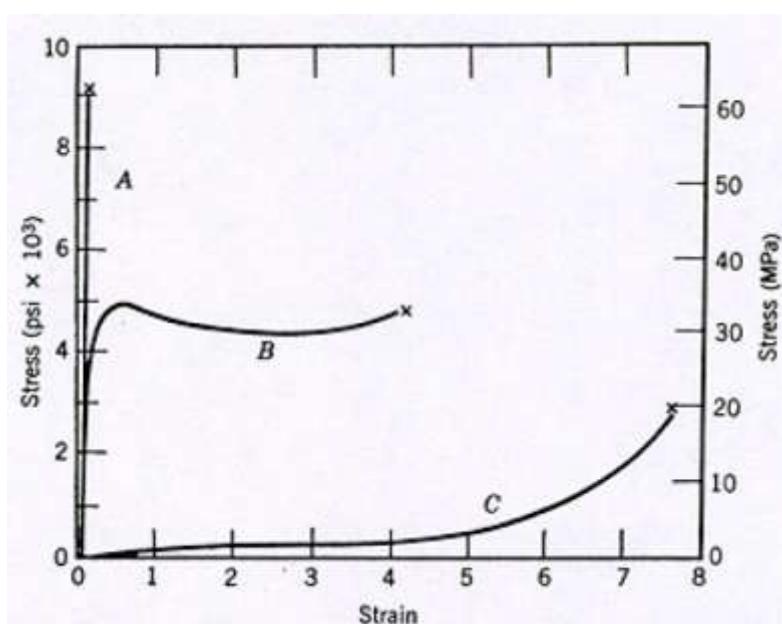



***Fig. 3.44*** *Curve sforzo-deformazione per polimeri fragili, plastici ed elastici*

Considerando la curva σ- ε per un polimero plastico (Fig.3.45): la deformazione elastica è concessa dai legami covalenti tra i monomeri che permettono di allungare le catene e recuperare poi la deformazione quando lo stress termina.

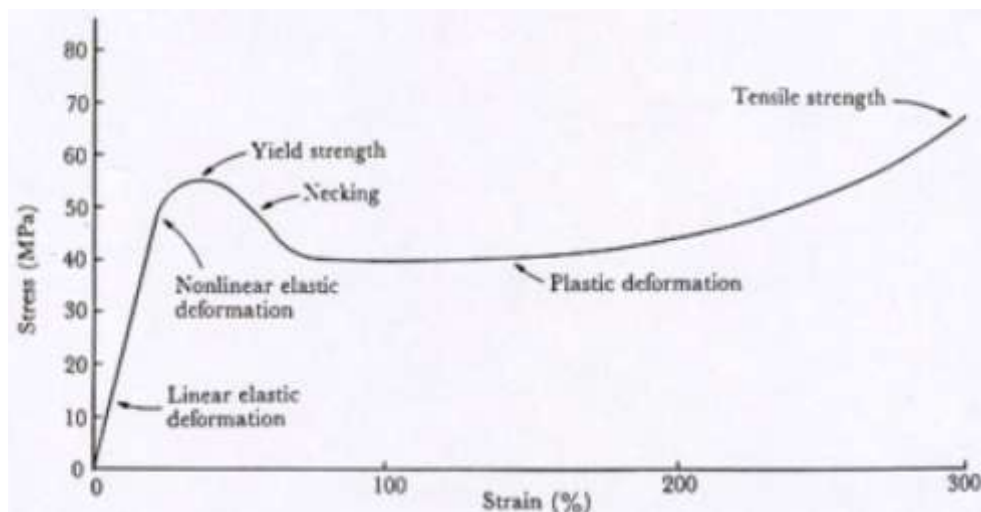



***Fig. 3.45*** *Curve sforzo-deformazione per un polimero plastico*

Il tratto iniziale della curva può essere lineare, tuttavia alcune zone delle catene possono richiedere ore o mesi per ritornare alle dimensioni originarie e ciò può indurre un comportamento elastico non lineare. Superato lo snervamento si ha un comportamento plastico (quindi una deformazione permanente) causato dallo scivolamento delle catene una sopra l'altra: ovviamente quanto più velocemente lo stress è applicato tanto più è favorito un comportamento fragile del polimero.

Da notare che, per i polimeri, l'aumento della temperatura avvicina il loro comportamento a quello di un elastomero e che, negli elastomeri, il modulo d'elasticità e la resistenza a trazione possono essere notevolmente aumentati con un processo chimico detto vulcanizzazione.

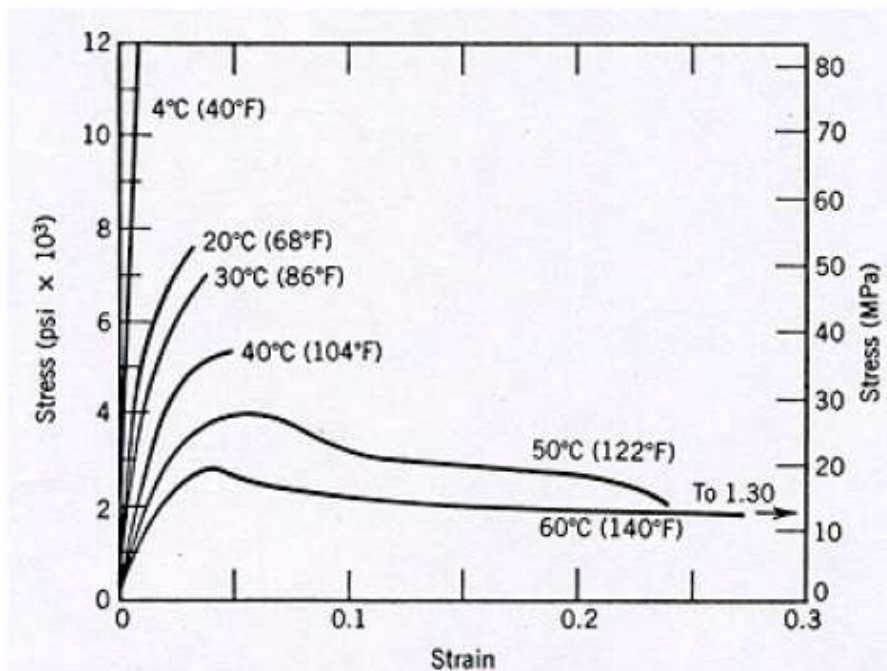



***Fig. 3.46*** *Curve sforzo-deformazione al variare della temperatura*

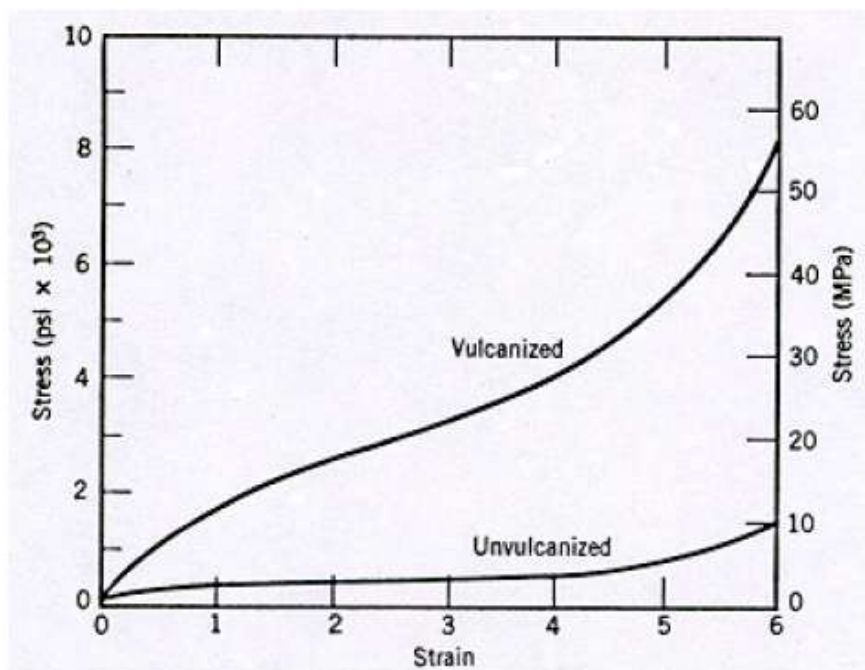



***Fig. 3.47*** *Curve sforzo-deformazione per una gomma vulcanizzata e non*

## 3.5.2 IL COMPORTAMENTO VISCO-ELASTICO DEI POLIMERI

E' difficoltoso classificare i polimeri come materiali solidi o fluidi viscosi [1-4], poiché le loro proprietà meccaniche dipendono molto dalle condizioni di test. Un polimero può mostrare tutte le caratteristiche di un solido vetroso, di una gomma elastica o di un fluido viscoso, a seconda della temperatura e del tipo di sollecitazione, quindi, della scala temporale di misura.

I polimeri sono usualmente descritti come materiali viscoelastici [1-4], un termine generico che enfatizza la loro posizione intermedia tra solidi elastici e liquidi viscosi. L'essere considerati in parte come liquidi viscosi discende dall'osservazione che la risposta di un polimero alle sollecitazioni dipende dal tipo di sollecitazione, soprattutto in termini di velocità e, quindi, di frequenza nel caso di sollecitazione armoniche.

La viscoelasticità dei polimeri è senz'altro una delle proprietà con cui si manifestano palesemente la complessità e peculiarità di tali materiali. A basse temperature e sollecitazioni quasi-statiche o ad alte frequenze di misura un polimero può essere vetroso con modulo di Young di $10^9$-$10^{10}$ $N/m^2$ e rompersi o fluire per deformazioni maggiori del 5%. Ad elevate temperature e sollecitazioni quasi-statiche o basse frequenze, lo stesso polimero può essere gommoso con modulo di $10^6$-$10^7$ $N/m^2$, potendo sopportare grosse estensioni (~100%) senza deformazione permanente. A temperature ancora più elevate, si presentano deformazioni permanenti sotto carico ed il polimero si comporta come un liquido molto viscoso. In un intervallo di frequenza o di temperature intermedio, nel caso di sollecitazioni quasi-statiche, comunemente chiamato range della transizione vetrosa, il polimero non si comporta ne come gomma ne come vetro, mostra un modulo intermedio, è viscoelastico e può dissipare un considerevole ammontare di energia di deformazione.

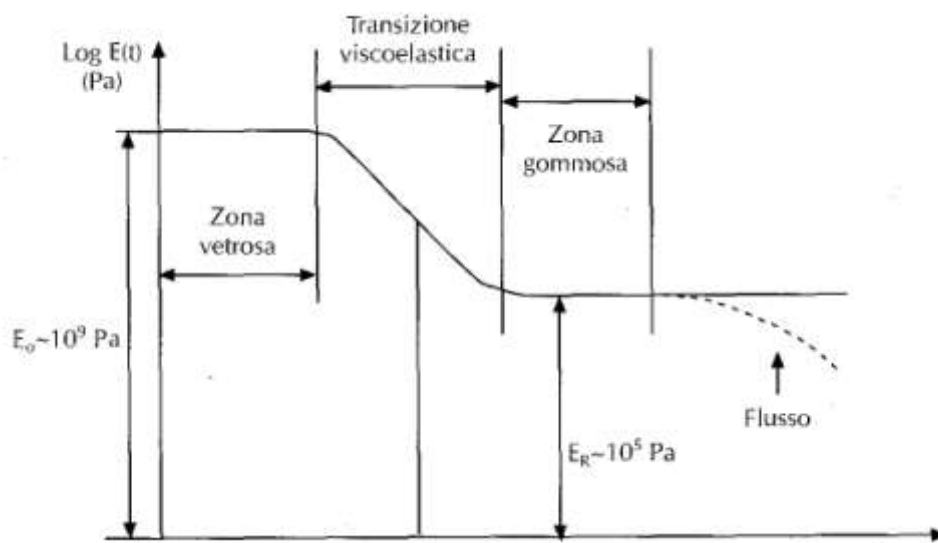



***Fig. 3.48*** *Modulo elastico in funzione della tenperatura*

In genere vengono discussi due tipi particolari di materiali ideali: il solido elastico ed il liquido viscoso. Il solido elastico ha una forma ben definita ed è deformato dalle forze esterne a una nuova forma di equilibrio. Alla rimozione della forza, esso ritorna esattamente alla forma originaria. Il solido immagazzina tutta l'energia che ottiene dal lavoro fatto dalle forze esterne durante la deformazione. Tale energia è poi disponibile per riportare il solido alla forma originaria una volta rimosse le forze esterne. Un fluido viscoso, d'altra parte, non ha una forma definita e fluisce irreversibilmente sotto l'azione di forze esterne.

Le proprietà viscoelastiche dei polimeri possono nella pratica venire opportunamente utilizzate ogni qualvolta si deve assorbire energia, ad esempio durante le oscillazioni forzate imposte alle strutture dalle macchine oppure durante gli urti o le prove d'urto. Durante i terremoti la capacità di smorzamento delle oscillazioni viene ad esempio utilizzata ponendo blocchi di gomma sotto gli appoggi delle travi portanti dei ponti o sotto i pilastri dei grattacieli costruiti in zone sismiche. Anche nelle costruzioni navali e in quelle automobilistiche la capacità dei polimeri di smorzare il suono viene ampiamente utilizzata.

Le proprietà meccanico-dinamiche [94-96] vengono studiate quantitativamente imponendo a un campione una sollecitazione oscillatoria sinusoidale di frequenza angolare ω e misurando la conseguente deformazione del provino. Se il materiale è perfettamente elastico si ha

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t \tag{145}$$

la deformazione è espressa da

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \tag{146}$$

Sollecitazione e deformazione hanno lo stesso periodo e sono in fase.

In un materiale viscoelastico esiste, invece, un angolo δ di ritardo tra sforzo e deformazione. Nei materiali viscoelastici la deformazione e in generale in ritardo rispetto alla sollecitazione. Nel caso meccanico-dinamico una volta applicata una sollecitazione sinusoidale la deformazione varia anch'essa in modo sinusoidale con la stessa frequenza ma è in ritardo di un angolo di sfasamento δ. È più conveniente dire, in modo del tutto equivalente, che la sollecitazione è in anticipo rispetto alla deformazione. Si ha così

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \tag{147}$$

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \tag{148}$$

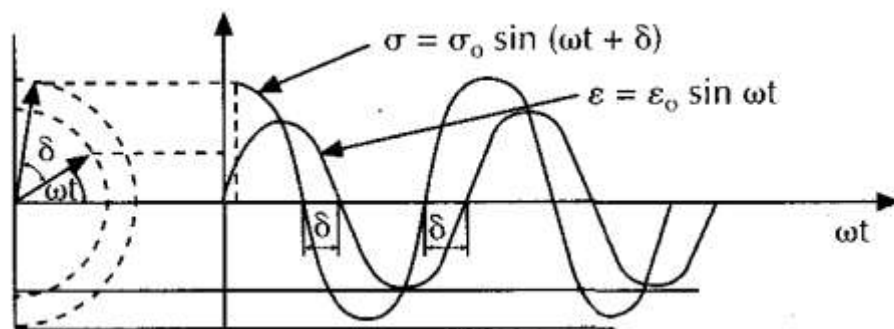



***Fig. 3.49*** *Andamento di ε e σ in funzione del tempo*

La fig. 3.49 mostra l'andamento di $\varepsilon$ e di $\sigma$ in funzione del tempo e la corrispondente rappresentazione vettoriale, al tempo generico t, di due vettori aventi modulo $\varepsilon_0$ e $\sigma_0$ inclinati sull'asse di riferimento orizzontale rispettivamente dell'angolo $\omega t$ e $\omega t + \delta$. La loro proiezione sull'asse verticale rappresenta i valori ε e σ delle equazioni 147 e 148 che si hanno al tempo t. Sviluppando l'ultima equazione si ottiene:

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t \cos \delta + \sigma_0 \cos \omega t \sin \delta \tag{150}$$

La sollecitazione che opera nel provino è quindi la somma di due contributi. Il contributo $(\sigma_0 \cos \delta) \sin \omega t$ è in fase con la deformazione mentre il contributo $(\sigma_0 \sin \delta) \cos \omega t$ è in quadratura e in anticipo di 90° rispetto alla deformazione. Si ponga

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta \tag{151}$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta \tag{152}$$

Facendo il rapporto $E_2/E_1$si ottiene:

$$\tan \delta = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \frac{E_2}{E_1} \tag{153}$$

Il rapporto $\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$ è detto modulo dinamico assoluto.

$E_1$ è la componente del modulo dinamico assoluto in fase con la deformazione ed $E_2$ è la componente del modulo dinamico assoluto in quadratura con la deformazione. Introducendo le ultime definizioni nell'equazione 150 si ottiene:

$$\sigma = \mathrm{E}_1 \varepsilon_0 \sin \omega \mathrm{t} + \mathrm{E}_2 \varepsilon_0 \cos \omega \mathrm{t} \tag{154}$$

Utilizzando la rappresentazione dei moduli $E_1$ ed $E_2$ nel piano dei numeri complessi, si osserva che essi sono rispettivamente la parte reale e la parte immaginaria del modulo complesso $\bar{E}$

$$\bar{\mathrm{E}} = E_1 + iE_2 \tag{155}$$

Operando infatti con la notazione dei numeri complessi la deformazione e lo sforzo sono espressi da

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0 \exp\,(i\omega t) \tag{156}$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 \exp\,[\mathrm{i}(\omega t + \delta) \tag{157}$$

Rapportando $\bar{\sigma}$ e $\bar{\varepsilon}$ si ha il modulo complesso:

$$\bar{E} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}} = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\right) \exp i\delta = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\right)(\cos\delta + i\sin\delta) = E_1 + iE_2 \tag{158}$$

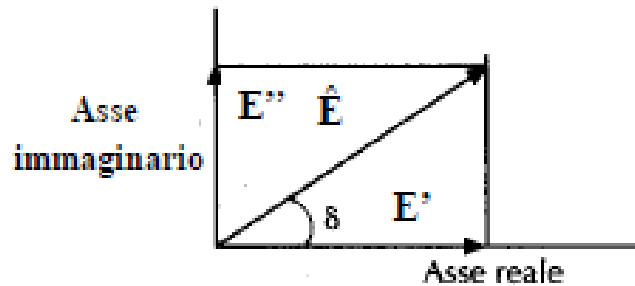



***Fig. 3.50*** *Rappresentazione del modulo complesso*

Le misure meccanico-dinamiche [97] sono un prezioso strumento di valutazione del comportamento meccanico dei polimeri in relazione alla loro struttura. Le misure di E1 a diverse frequenze angolari e a diverse temperature si fanno usando strumenti specifici (come ad es. il DTMA), che applicano deformazioni assiali sinusoidali.

## 3.5.2.1 PROVE DINAMO-MECCANICHE

Il campione, generalmente in forma di barretta, viene sottoposto ad una oscillazione sinusoidale (frequenza da 1 a 100Hz), imposta mediante un sistema elettromagnetico. Uno strumento impiegato in questo tipo di analisi è l'analizzatore dinamico-meccanico *DMA*. Esso è composto da:

- Un portacampione che ha una geometria specifica in base al tipo di test da effettuare;
- Un attuatore che trasferisce la sollecitazione al campione;
- Una fornace;
- Un sistemi di sensori che registrano i dati (spostamenti tensioni temperatura ecc.).

La fornace impiegata costituisce l'ambiente che ospita il campione durante l'analisi. La sua massa è relativamente piccola allo scopo di assicurare una risposta veloce alle variazioni di temperatura richieste. L'ambiente che circonda il campione è depurato con azoto gassoso per migliorare il risultato dell'analisi.

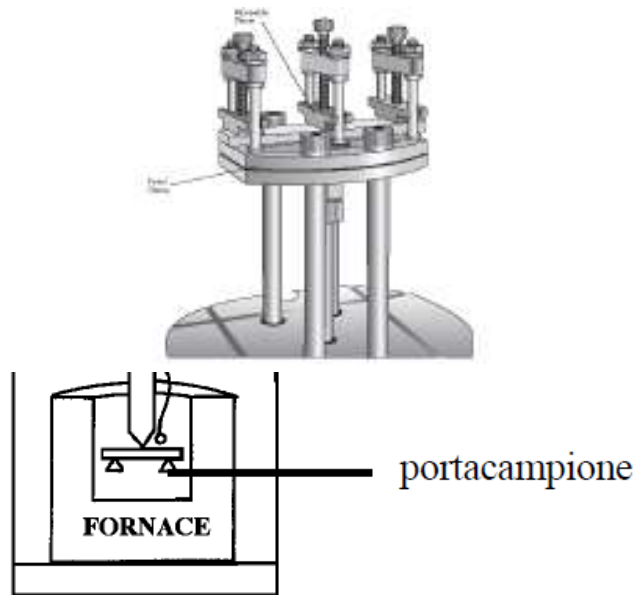



***Fig. 3.51*** *Portacampione e fornace DMA*

Il *DMA* può essere usato per la misura di numerosi parametri meccanici.

- Nel *temperature scan mode*, la temperatura viene programmata mentre la frequenza e lo *stress* sono tenuti fissati. Il comportamento reologico viene studiato in funzione della temperatura (o del tempo, se vale il principio di sovrapposizione tempo-temperatura) registrando i cambiamenti dello *strain* e di *tanδ*.
- Nel *frequency scan mode*, la frequenza di oscillazione è variata in un intervallo che si estende da *1 Hz* a *100 Hz*. Le curve isoterme così ottenute consentono la eventuale ricostruzione della master curve.
- Nello *stress scan mode* vengono fatti variare linearmente nel tempo *stress statico* e *dinamico*. Temperatura e frequenza sono invece mantenute ad un valore fissato.

Le due configurazioni più usate sono quelle denominate *three point bending* (flessione vincolata in tre punti) e *parallel plates* (piatti paralleli).

Il *three point bending* viene utilizzato tipicamente per materiali ad alto modulo come resine e polimeri nello stato vetroso. Questa geometria produce una flessione su di un campione sorretto da due "coltelli" posti simmetricamente rispetto al punto di contatto dell'asta come mostrato nella figura.

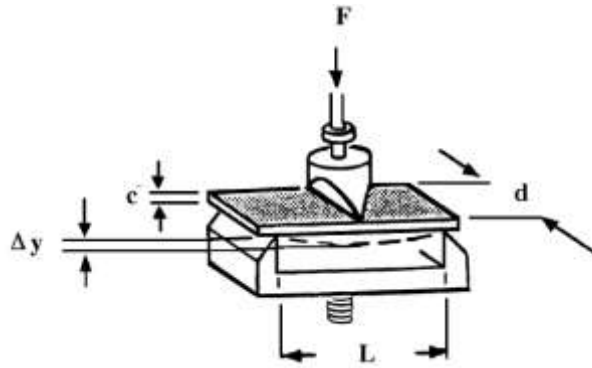



***Fig. 3.52*** *Provino nella configurazione di test a flessione su tre punti*

La geometria *parallel plates* è usata invece per lo studio di materiali di basso modulo a partire da sistemi come polimeri a temperature superiori a quella di transizione vetrosa fino a campioni a bassa consistenza. Produce una compressione statica o dinamica del materiale tra due dischi paralleli di uguale diametro, come mostrato in figura.

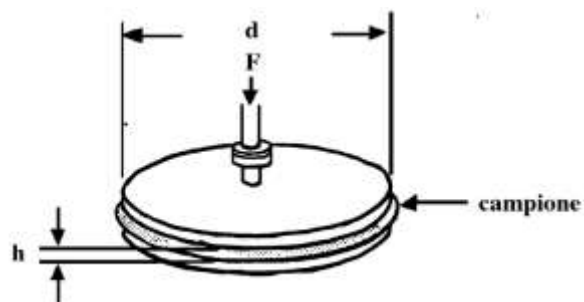



***Fig. 3.53*** *Rappresentazione dei parallel plates*

- modulo elastico
- temperatura di transizione vetrosa
- transizioni di fase
- loss modulus
- storage modulus

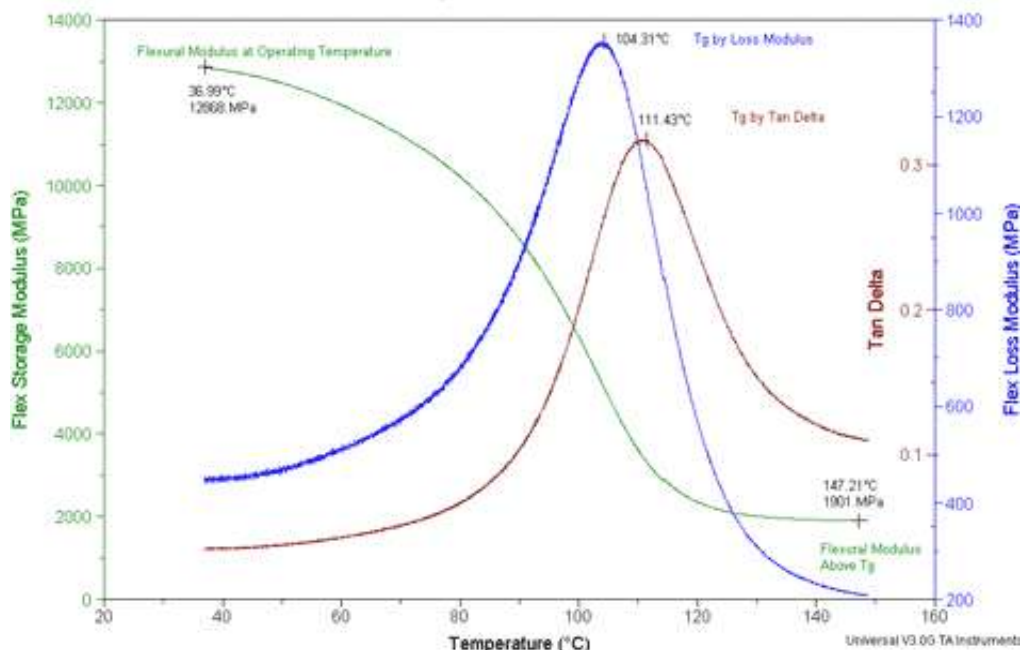



***Fig. 3.54*** *Tipico diagramma per una prova DMA*

Le condizioni di prova sono studiati e definiti da *associazioni tecniche*:

- American Society for Testing and Materials (ASTM)
- Society of the Plastic Industry (SPI)
- Society of Plastic Engineers (SPE)

## 3.5.3 PROVE DI CONDUCIBILITÁ TERMICA

La calorimetria è l'insieme delle tecniche di misurazione delle quantità di calore cedute o assorbite durante reazioni chimiche, passaggi di stato e altri processi chimici e fisici, ai fini di determinare i calori specifici, le capacità termiche, i calori latenti relativi alle sostanze, ai corpi e ai processi in esame [98,99].

L'analisi termica, invece, studia le trasformazioni che avvengono nei materiali per effetto della temperatura.

Tra le varie quantità e grandezze termiche, di notevole importanza, soprattutto nel campo dell’edilizia e materiali da costruzione, è il *coefficiente di conducibilità termica*. La conoscenza di tale grandezza permette di dimensionare gli spessori dei materiali, di scegliere il tipo di materiale e l’accoppiamento degli stessi.

La conducibilità termica o conduttività termica (indicata con λ o k) è il rapporto, in condizioni stazionarie, fra il flusso di calore e il gradiente di temperatura che provoca il passaggio del calore, cioè la quantità di calore trasferita nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie in direzione perpendicolare al gradiente di temperatura (trascurando i contributi al trasferimento di calore per convezione e per irraggiamento termico). In altri termini, la conducibilità termica è una misura dell'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore (vale a dire maggiore è il valore di λ, meno isolante è il materiale). Essa dipende solo dalla natura del materiale, non dalla sua forma.

La conducibilità termica non va confusa con la *diffusività termica* o *conducibilità termometrica* che è il rapporto fra la conducibilità termica e il prodotto fra densità e calore specifico della data sostanza (espressa nel Sistema internazionale in $m^2/s$, analogamente a tutte le "diffusività") e misura l'attitudine di una sostanza a trasmettere, non il calore, bensì una variazione di temperatura.

La conducibilità termica è definita come la costante di proporzionalità fra il flusso di calore osservato e il gradiente di temperatura che lo provoca:

$$k = \frac{Q_{rate} \cdot d}{S \cdot (T_2 - T_1)} \tag{159}$$

dove:

- $Q_{rate}$ è il tasso di trasferimento di calore (in inglese *heat flow rate*), misurato in Watt, cioè la quantità di energia termica (calore) che transita nell'unità di tempo attraverso la sezione S dell’oggetto interposto tra i due luoghi a temperatura T diversa;
- *d* è lo spessore dell’elemento, espresso in metri, ovvero la distanza tra i punti a temperatura $T_1$ e $T_2$, che si suppone omogeneo;
- *S* è l'area, misurata in metri quadri, della sezione trasversale dell’elemento ortogonale rispetto alla direzione del gradiente di temperatura, ovvero alla direzione attraverso la quale viene misurata lo spessore *d*;
- $T_1$ e $T_2$ sono le temperature, misurate in kelvin, assunte agli estremi dell’elemento.

La conducibilità termica di una sostanza dipende dalla temperatura (per alcuni materiali aumenta all'aumentare della temperatura, per altri diminuisce), dall'induzione magnetica, da fattori fisici come la porosità e, nel caso degli aeriformi dalla pressione.

Nelle unità del Sistema internazionale la conducibilità termica è misurata in Watt per metro-kelvin, W/(m·K), essendo il Watt (W) l'unità di misura della potenza.

In genere, la conducibilità termica va di pari passo con la conducibilità elettrica; ad esempio i metalli presentano valori elevati di entrambe. Una notevole eccezione è costituita dal diamante, che ha un'elevata conducibilità termica, ma una scarsa conducibilità elettrica.

***Tab. 3.2*** *Conducibilità termica di alcune sostanze*

| Sostanza | W/(m·K) |
|---|---|
| diamante | 1000 - 2600 |
| rame | 390 |
| alluminio | 236 |
| platino | 70 |
| vetro | 1 |
| laterizi | 0,8 |
| acqua distillata | 0,6 |
| lana | 0,05 |
| polistirolo espanso | 0,045 |
| aria secca (a 300 K, 100 kPa) | 0,026 |

Il termoflussimetro è l'unico strumento che permette di misurare in maniera quantitativa, chiara e precisa e senza alcun intervento distruttivo, l'esatto isolamento termico di un elemento divisorio.

Il flussso di calore che attraversa l'elemento di cui si vuole misurare la conducibilità termica viene rilevato da un  sistema di sensori posti sul lato dell'elemento a contatto con la camera a temperatura inferiore.

Generalmente il monitoraggio del flusso è effettuato su un arco temporale almeno di 24 ore per valutare con precisione il flusso stazionario e ridurre al minimo l'incidenza del flusso transitorio che si verifica inizialmente.

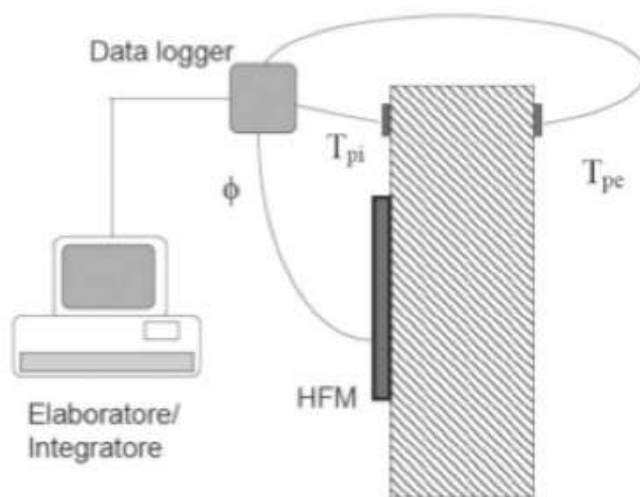



***Fig. 3.55*** *Schema di funzionamento di un termoflussimetro*

# PARTE SPERIMENTALE

## 4.1 INTRODUZIONE

La crescente richiesta di materie prime da parte degli Stati che da sempre sono stati il traino dell'economia mondiale e, oggi più che mai, dalle economie in forte espansione, su tutte la Cina, ha dato un forte impulso alla ricerca e alla definitiva crescita di impiego di risorse poco conosciute e/o sottostimate, ma dalle concrete potenzialità applicative.

Indubbiamente, molte delle risorse disponibili, sebbene siano state oggetto di ricerca nel corso dei decenni dello secolo scorso, non hanno mai avuto alcuno spiraglio applicativo legato alla sostenibilità economica che nelle scelte industriali ha rappresentato sempre il parametro principale di selezione. Le economie più sviluppate e sensibili alle problematiche ambientali, sotto l'effetto della crescente apprensione verso i cambiamenti climatici, ma in generale verso il degrado ambientale, in termine di risorse e qualità disponibile per le generazioni viventi e future, e delle direttive a livello internazionale hanno finalmente inserito la "sostenibiltà ambientale" tra i parametri di scelta multicriteriale, attribuendogli un notevole peso.

Nel settore dei materiali, i polimeri costituiscono, fin dalla seconda metà del 1900, una concreta alternativa ai materiali considerati convenzionali e in pochi decenni hanno cambiato radicalmente il modo di costruire. Attualmente costituiscono la base per le più svariate applicazioni, dalle più semplici a quelle tecnologicamente avanzate e complesse.

I materiali compositi a matrice polimerica hanno poi sancito la definitiva consacrazione dei polimeri come materiali *elitari*, grazie alla libertà di progettazione del materiale. Tanti altri aspetti si sono rivelati altresì determinanti nella crescita incontrollata del mercato dei materiali a base polimerica a dispetto dei più classici.

Anche i materiali a base polimerica, fin dalla loro origine, sono sottostati alla regola dell' "economicità", per cui l'aspetto ambientale è stato trascurato in quanto i materiali più competitivi sono quelli sintetici di origine petrolchimica. Inoltre, tali materiali sono nella stragrande maggioranza dei casi non smaltibili in ambiente, in un tempo scala comparabile alla vita umana, per cui costituiscono un inquinante importante.

La crescente produzione globale di materiali a base polimerica, il progressivo e crescente esaurimento delle risorse non rinnovabili, da cui sono ottenuti, hanno indotto il mondo produttivo ad acquisire maggiore sensibilità ambientale.

In generale, un materiale viene erroneamente considerato *eco-compatibile* solo in relazione allo smaltimento finale, limitandosi quindi all'uguaglianza con la *degradazione naturale o biodegradazione.* In realtà, la definizione implica tutto il ciclo di vita del materiale *"from cradle to grave",* quindi dall'ottenimento della materia prima, al fine vita attraverso i processi di trasformazione che subisce e le applicazioni in cui viene impiegato. Quanto appena esposto è l'obiettivo del LCA (Life Cycle Assessment).

Trattando di materiali compositi a matrice polimerica, l'obiettivo virtuoso, senza alcun dubbio, è quello di impiegare materiali provenienti da risorse naturali rinnovabili, a basso impatto ambientale durante il ciclo produttivo, riciclabili e/o facilmente smaltibili in ambiente a fine vita, data la biodegradabilità della matrice e del rinforzo. Quanto esposto consentirebbe non solo di ridurre la richiesta di materie prime, quindi ridurrebbe il depauperamento delle risorse terrestri, ma al tempo stesso ridurrebbe al minimo le volumetrie di abbanco in discarica, restituendo alla terra i prodotti della degradazione.

Attualmente il mercato non agevola la diffusione degli eco-compositi a causa dei prezzi assolutamente non competitivi degli eco-polimeri rispetto a quelli convenzionali di origine petrolchimica. Inoltre, le scarse caratteristiche meccaniche, notevolmente inferiori ai polimeri tipicamente impiegati, limitano il loro possibile impiego ad applicazioni di bassa rilevanza ingegneristica.

Coscienti che il percorso degli eco-compositi sia un obiettivo a lungo termine, l'orizzonte immediato è rappresentato sicuramente dall'impiego di rinforzi da risorse naturali rinnovabili in un tempo scala di pochi anni. In

particolar modo l'interesse maggiore è rivolto alle fibre naturali di origine vegetale.

A differenza degli eco-polimeri, le fibre naturali, di qualunque origine, mostrano una forte competitività nel mercato dovuto al costo notevolmente inferiore rispetto alle fibre convenzionali (vetro, carbonio, etc.).

Le ragioni dell'affermarsi delle fibre naturali, soprattutto nelle applicazioni non strutturali, è legato oltre al lato economico, anche a quello ambientale: tali materiali sono rinnovabili in quantità illimitate; biodegradabili; se smaltite termicamente, possono essere utilizzati in tutti quei processi di produzione di energia termica; il processo produttivo è a basso impatto ambientale, soprattutto se tali rinforzi sono impiegati sotto forma di tessuti non prettamente tecnici (es. tessuto non tessuto ad orientazione random). Di contro, spesso è necessario migliorare l'affinità con la matrice in cui sono immersi, per cui si utilizzano trattamenti chimico-fisici che potrebbero ridurre gli aspetti positivi lagati all'economicità e al contenuto impatto ambientale.

Attualmente i materiali compositi sono rinforzati, nella stragrande maggioranza dei casi (circa il 90% dei casi), con fibre di vetro che è la fibra sintetica per eccellenza, prodotta ovviamente da risorse non rinnovabili, confinando l'utilizzo di fibre di carbonio, le aramidiche o altro ad applicazioni specifiche, dato l'elevato costo. La relativa semplicità produttiva, il costo basso se riferito alle elevate prestazioni di resistenza termica, chimica e meccanica, fanno del vetro la fibra più diffusa, anche se penalizzata da una densità alta, rispetto alle fibre di carbonio e aramidiche, che rende meno leggeri i manufatti.

Negli ultimi anni sta aumentando la richiesta di prodotti derivati dalle fibre vegetali, grazie anche all'interesse da parte dei consumatori per i materiali naturali ritenuti a buon ragione non pericolosi per la salute. Le fibre naturali offrono all'industria nuove opportunità e nuove scelte. Il loro carattere innovativo e la loro immagine positiva hanno risvegliato l'interesse di un gran numero di aziende nei più svariati settori dell'economia.

In campo ingegneristico, nelle applicazioni non strutturali, le fibre naturali possono attualmente competere con le fibre di vetro, ma non certamente con le fibre di carbonio e le aramidiche impiegate in applicazioni strutturali.

In passato, le fibre naturali di origine vegetale non sono state prese in considerazione come rinforzi per materiali compositi a causa di alcuni

problemi connessi con il loro utilizzo, legati soprattutto alla bassa stabilità termica, alla natura idrofila che li rende incompatibili con le principali matrici polimeriche e causa rigonfiamento dei manufatti, all'incostanza e imprevedibilità delle proprietà degli *stockings*. Negli ultimi anni tali problemi sono stati notevolmente ridotti, grazie agli enormi passi avanti compiuti dalla ricerca, per cui, sebbene le fibre vegetali possiedono modeste proprietà meccaniche assolute, rispetto alle fibre di vetro (la differenza si attenua se si confrontano le proprietà specifiche, ossia in rapporto alla densità del materiale), hanno anche un basso peso specifico e prezzi contenuti, per cui hanno attirato l'interesse dei più svariati settori industriali. Tali aspetti, in unione all'assenza di problematiche connesse alla maneggiabilità da parte degli operatori e alla lavorazione dei prodotti per i sistemi produttivi, hanno fatto si che l'uso delle fibre naturali diventasse relativamente comune in diversi settori industriali, tra cui l'automotive, il packaging e il civile.

## 4.2 OBIETTIVI

Il presente lavoro di tesi si colloca all'interno del settore di ricerca incentrato sullo studio di innovativi materiali compositi polimerici rinforzati con fibre naturali di origine vegetale.

Tra le fibre naturali, le fibre di canapa sono le più promettenti in termini di rapporto proprietà meccaniche/costo.

La maggior parte degli studi presenti in letteratura sono incentrati sull'impiego dei tessuti non tessuti ad orientazione random, alias *mat*, che costituiscono una economica alternativa ai tessuti tecnici a forte orientazione del rinforzo. Diversi studi mostrano che l'orientazione casuale delle fibre porta ad una riduzione dell'efficienza di rinforzo [51]

In precedenti studi condotti dal candidato con il gruppo di ricerca del Prof.Recca [93,100] sono state analizzate delle soluzioni ibride vetro/canapa per la realizzazione di raccordi curvi per l'industria chimica. In tali lavori si è evidenziato il vantaggio in termini di riduzione dei costi e delle masse connesso all'utilizzo di mat in fibra di canapa in sostituzione dei mat in fibra di vetro. Tuttavia, nello stesso lavoro si è evidenziata la scarsa capacità di rinforzo dei tessuti non tessuti (Mat) in fibra di canapa, dovuto a:

– Assenza di orientazione specifica delle fibre;

- Presenza di fibre corte nei tessuti mat;
- Bassa percentuale di rinforzo nel composito, dipendente anche dalla tecnica produttiva;
- Scarsa adesione all'interfaccia tra fibra e matrice.

I limiti evidenziati sopra sono alla base delle ricerche presentate in questo lavoro di tesi in cui l'obiettivo primario è stato quello di analizzare singolarmente la possibilità e l'effetto legato a:

- Utilizzo di tessuti, con filati ritorti di yarn di fibre, con orientazione bidirezionale 0/90 per massimizzare il contributo meccanico del rinforzo nel composito;
- Trattamento superficiale delle fibre per migliorare la compatibilità all'interfaccia tra fibra e matrice;
- Tecniche di trasfromazione e produzione dei manufatti in composito, in grado di massimizzare la presenza del rinforzo nel composito e limitare l'influenza dei fattori negativi (es. presenza dei "vuoti").

Lo studio di caratterizzazione meccanica è stato corredato da quello sui modelli previsionali del comportamento meccanico. Infatti, in campo ingegneristico, è indispensabile disporre di modelli fisici che permettono di stimare con adeguata accuratezza la proprietà meccaniche dei materiali da impiegare. Come già esposto nel capitolo 3, i convenzionali modelli previsionali (regola delle miscele) presenti in letteratura sono per lo più sviluppati ed offrono risultati attendibili solo per compositi con rinforzi di tipo unidirezionale e di fibre sintetiche, quindi in linea generale per materiali di natura omogenea (es. vetro resina). Pochi studi sono incentrati sui compositi rinforzati con tessuti tecnici bi- o multiassiali a base di fibre corte (mat) o yarn di fibre corte, soprattutto se di natura vegetale. Nel corso degli ultimi anni sono stati proposti alcuni modelli previsionali che permettono di apportare le opportune correzioni ai modelli classici della micromeccanica in relazione alle peculiarità dei tessuti di fibre vegetali. Considerando che la letteratura è scarna di pubblicazioni riguardo studi su tali modelli previsionali e non essendo possibile avere la certezza assoluta che essi si adattano al tipo di composito in esame, si è proceduto con lo studio e la validazione dei più significativi modelli con i compositi oggetto dello studio.

Considerando, inoltre, che un classico problema con i filati ritorti è il loro diverso comportamento meccanico, allo stato secco e reticolato all'interno del composito, [68,89], si è pensato di finalizzare lo studio a sviluppare un approccio affidabile per determinare le proprietà del filato in modo da poterle usare direttamente nei modelli previsionali per ottenere sempre più risultati aderenti al comportamento.

In conclusione, ci si è posto l'obiettivo di individuare un possibile campo di impiego e le eventuali limitazioni ai materiali studiati con l'intento di analizzare gli aspetti positivi e negativi di natura ingegneristica.

## 4.3 SVILUPPO DELL'ATTIVITÁ DI RICERCA SPERIMENTALE

Il lavoro di ricerca sperimentale è stato svolto interamente presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica (D.I.I.M.), dell'Università degli Studi di Catania ed in modo complementare presso l'Istituto di Chimica e Tecnologia dei Polimeri (ICTP) del CNR, sezione di Catania, per quanto riguarda la caratterizzazione meccanica dei materiali. La fase conclusiva che concerne con la caratterizzazione delle proprietà termiche dei materiali è stata sviluppata presso l' Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik della Technische Universitat di Clausthal (Germania).

L'attività di ricerca ha riguardato lo studio di una serie di materiali compositi a matrice termoindurente di natura epossidica, rinforzati rispettivamente con quattro diversi tessuti composti rispettivamente di canapa (un tessuto non tessuto ad orientazione random e un biassiale 0/90), ibrido canapa/cotone (biassiale 0/90) e lino (biassiale 0/90).

La prima fase dello studio ha avuto come obiettivo il raggiungimento delle estreme proprietà meccaniche dei compositi, a partire dalle proprietà base dei materiali costituenti. L'obiettivo è stato perseguito agendo sui parametri da cui dipendono le proprietà meccaniche, ossia il contenuto in volume di rinforzo, l'interfaccia tra fibra e matrice, il contenuto di "vuoti" nei compositi.

Per raggiungere l'obiettivo sono stati adottati due processi produttivi simili, ma a differente contenuto tecnologico. Il secondo processo adottato (Bag Molding e reticolazione in pressa a temperatura controllata) ha

permesso di raggiungere percentuali in volume di rinforzo maggiori rispetto al primo processo (RTM).

Per ottimizzare l'interfaccia tra i due costituenti base è stata valutata l'opportunità di impiego di una serie di trattamenti superficiali sulle fibre. L'influenza dei trattamenti è stata monitorata direttamente sulle caratteristiche fisico-meccaniche delle singole fibre/filati e in esercizio nei compositi. A tal proposito, il comportamento dei compositi prodotti è stato caratterizzato, mediante analisi meccaniche quasi-statiche, sia in trazione che in flessione.

Inoltre, su un numero rappresentativo di campioni è stata condotta una campagna di scansioni al microscopio volta a determinare l'eventuale presenza di difetti interni.

La prima fase dello studio si è conclusa con la determinazione sperimentale della conducibilità termica dei compositi, utile in campo applicativo quando è richiesto ai materiali un livello minimo di isolamento termico.

La seconda fase del lavoro ha riguardato l'approfondimento delle peculiarità delle fibre naturali e di due modelli previsionali in grado di predire le caratteristiche dei compositi realizzati, con l'obiettivo di comprendere quali sono i margini di affidabilità e gli eventuali coefficienti di sicurezza da adottare nella stima delle proprietà in fase di progettazione con i materiali compositi. Tale fase sfrutta i risultati ottenuti nella precedente e propedeutica caratterizzazione fisico-meccanica delle fibre impiegate e dei compositi realizzati.

La terza ed ultima fase del lavoro è focalizzata sullo studio di una possibile applicazione ai materiali studiati, con l'intento di analizzare gli aspetti positivi e negativi di natura ingegneristica atti ad individuare possibili campi di impiego ed eventuali limitazioni. A tal proposito è stato progettato un sistema composito di tipo *sandwich* utilizzando gli eco-compositi studiati, come pannelli esterni (pelli), e un core material, sempre ecocompatibile, costituito da legno di balsa pressata.

In particolare il sistema sandwich è stato adeguato allo svolgimento delle funzioni (UNI 8290) di elemento di chiusura orizzontale inferiore (solaio a terra) e superiore (copertura) in un modulo abitativo prefabbricato a telaio metallico.

## 4.4 MATERIALI E METODI IMPIEGATI

### 4.4.1 MATERIALI

L'esigenza di investigare il comportamento dei materiali compositi, al variare del tipo di fibra e della tipologia di tessuto, ha portato alla selezione e impiego di quattro differenti, per struttura e/o composizione, tessuti di rinforzo. Questi tessuti sono stati singolarmente combinati con una matrice termoindurente di natura epossidica. Le resine epossidiche sono, infatti, annoverate tra le migliori sotto tutti gli aspetti fisico-chimico-meccanici. Per tale ragione sono in genere impiegate in applicazioni che richiedono elevate prestazioni. La resina adottata non rientra nella categoria delle "eco-compatibiili", ma la scelta è da attribuire alla volontà di produrre uno studio concretamente e immediatamente spendibile in campo applicativo e non costituire, quindi, una mera indagine conoscitiva dalle scarse possibilità di impiego. L'impiego di una matrice eco-compatibile purtroppo, allo stato attuale, renderebbe insostenibile la produzione in serie di un manufatto in composito, dato l'elevato costo dei polimeri eco-compatibili. In attesa della sostenibilità economica degli eco-polimeri, la via percorribile che può avere un impatto positivo sul sistema produttivo industriale è, quindi, rappresentata dall'impiego di tessuti di fibre vegetali in matrici convenzionali.

#### 4.4.1.1 COMPONENTE DI RINFORZO

I rinforzi utilizzati sono:

- *Mat* Tessuto non tessuto di fibre di canapa ad orientazione random nel piano;
- *b607* Tessuto biassiale 0/90 di fibre di canapa;
- *b6240C* Tessuto biassiale 0/90 di fibre di canapa e cotone;
- *Biotex* Tessuto biassiale 0/90 di fibre di lino;

Le fibre di canapa sono state selezionate in quanto sono le più promettenti in termini di rapporto proprietà meccaniche/costo ed inoltre sono ampiamente coltivabili, come lo erano nel passato, nei climi europei.

Il tessuto ibrido canapa/cotone (B6240C) è stato scelto poiché ha un costo inferiore a quello puro in canapa (B607). Quindi, si vuole valutare l'eventuale opportunità di impiego di un tessuto che permette di raggiungere le medesime proprietà meccaniche, ma ad un costo inferiore.

Il tessuto di fibre di lino è stato preso in considerazione dell'elevate proprietà meccaniche delle fibre e del fatto che queste possono essere coltivate nei climi europei. Inoltre, a differenza del Mat, B607 e B6240 si tratta di un tessuto tecnico appositamente studiato e realizzato come rinforzo nei materiali compositi.

***Mat***

Il tessuto non tessuto denominato *mat* è un tappeto piano composto interamente da fibre di canapa a distribuzione random nel piano. E' stato fornito dall'azienda Hemcore Ltd., United Kingdom.

Si presenta di colore marrone chiaro, tendente al giallo, con una superficie ruvida e irregolare a causa dell'eterogeneità delle fibre e della differente densità nel tessuto. Le caratteristiche del feltro e delle fibre che lo costituiscono sono riepilogate in Tab. *4.1*.

Le proprietà del feltro e la lunghezza delle fibre sono state tratte dal data sheet della compagnia produttrice, mentre, lo spessore e il peso per unità di superficie sono state determinate sperimentalmente.

Il costo del feltro è stato ottenuto da una ricerca di mercato condotta in Germania su alcune aziende europee, ma non solo, che producono fibre di canapa. In particolare, il costo riportato in tabella è il minore trovato.

***Tab. 4.1*** *Caratteristiche del feltro e delle singole fibre di canapa impiegati*

| **Proprietà Mat** | | |
|---|---|---|
| **Caratteristica** | **Valore** | **U.d.m.** |
| *Peso medio per unità di superficie* | 780 | $g/m^2$ |
| *Lunghezza fibre* | *10 - 120* | *mm* |
| **Costo** | **0,48** | **€/kg** |
| **considerando 650 $g/m^2$* | **0,37*** | **€/m²** |

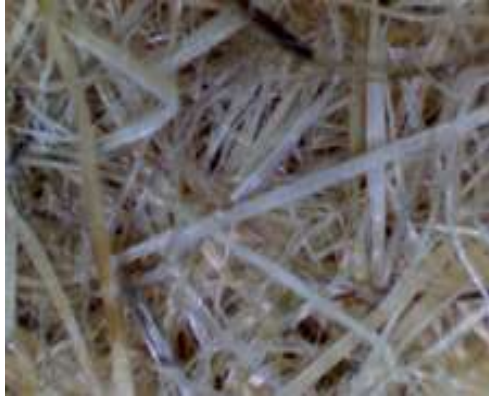



***Fig.4.1*** *Fibre di canapa estratte dal mat*

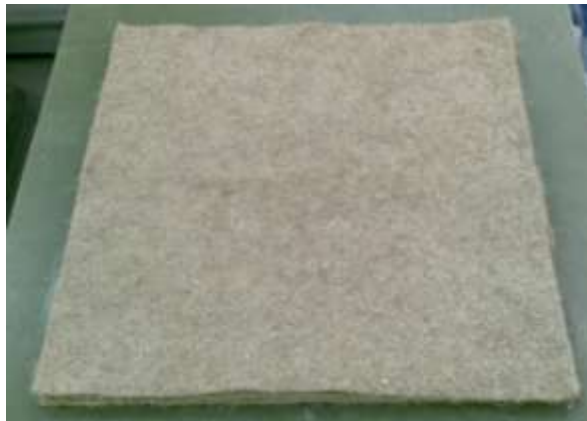



***Fig.4.2*** *Tessuto non tessuto di fibre di canapa*

***Fig.4.3*** *Rotoli di tessuto non tessuto di fibre di canapa*

***B607***

Il nome commerciale del tessuto è *B607 Natural Summer Cloth* - ed è un *plain weave* composto di canapa al 100%.

Il nome commerciale del tessuto dichiara nettamente il fine per cui è stato pensato, ossia i capi tessili estivi, per cui si tratta di un tessuto che per i materiali compositi non è tecnico. Il tessuto ha subito un processo di semi-sbiancamento con sanforizzazione, ossia un particolare procedimento che permette al tessuto tessile di mantenere una certa stabilità dimensionale anche dopo lavaggio dei capi.

Il fatto che non è un tessuto "tecnico" non preclude, come dimostra il lavoro sperimentale condotto, che possa essere impiegato anche nel settore industriale dei compositi polimerici.

Si presenta di colore bianco/giallo relativamente ruvido al tatto. Il tessuto è prodotto in U.S.A. e fornito dall'azienda Enviro Textiles LLC.

***Tab. 4.2*** *Caratteristiche del tessuto B607*

| ***Proprietà B607*** | | |
|---|---|---|
| ***Caratteristica*** | ***Valore*** | ***U.d.m.*** |
| *Peso medio per unità di superficie* | 245 | $g/m^2$ |
| *Larghezza rullo* | 1,48 | m |
| *Configurazione tessuto* | *18n x 18n* | |
| ***Costo*** | ***7,97*** | $\$/m^2$ |

***Fig.4.4*** *Tessuto B607*

***Fig.4.5*** *Immagine al microscopio ottico (100x) delle fibre ritorte del B607*

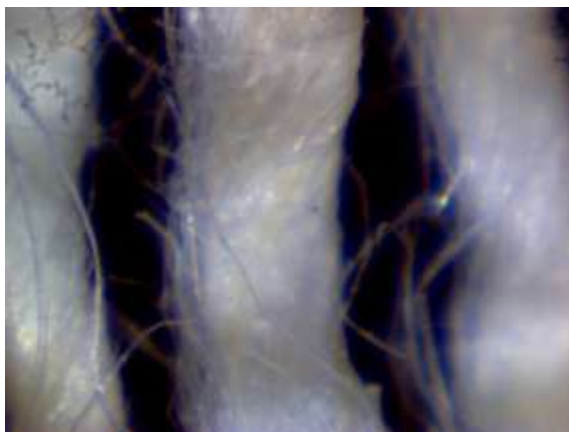



***Fig.4.6*** *Immagine al microscopio ottico (200x) delle fibre ritorte del B607*

***B624OC***

Il nome commerciale del tessuto è *B6240C Natural Muslin Plain Weave* ed è un *plain weave* composto per il 45% di canapa e per il 55% di cotone.

Il tessuto nasce, come il B607, per scopi tessili, quindi, non si tratta, per i materiali compositi, di un tessuto tecnico. Anche il B6240C ha subito un processo di semi-sbiancamento con sanforizzazione. Inoltre è stato trattato con un ammorbidente cationico. Questo non preclude, come dimostra il lavoro sperimentale condotto, che possa essere impiegato anche nel settore industriale dei compositi polimerici.

Si presenta di colore bianco brillante e liscio al tatto. I filati di cui è composto il tessuto sono di diametro inferiore rispetto a quelli del B607, quindi, rendono il tessuto più liscio e fitto.

Il tessuto è prodotto in U.S.A. e fornito dall'azienda Enviro Textiles LLC.

***Tab. 4.3****Caratteristiche del tessuto B6240C*

| ***Proprietà B6240*** | | |
|---|---|---|
| ***Caratteristica*** | ***Valore*** | ***U.d.m.*** |
| *Peso medio per unità di superficie* | 175 | g/m$^2$ |
| *Larghezza rullo* | 1,48 | m |
| *Configurazione tessuto* | *18s x 18s* | |
| ***Costo*** | ***4,25*** | $\$/m^2$ |

***Fig.4.7*** *Tessuto B6240C*

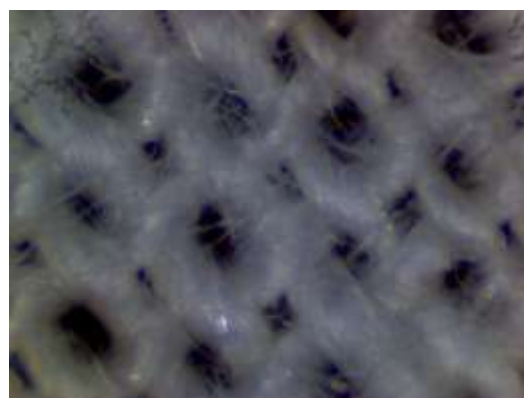



***Fig.4.8*** *Immagine al microscopio ottico (100x) delle fibre ritorte del B6240*

***Fig.4.9*** *Immagine al microscopio ottico (200x) delle fibre ritorte del B6240*

## ***Biotex***

É il nome commerciale del tessuto prodotto dalla azienda inglese Composites Evolution a configurazione *Twill 3x3* composto al 100% da fibre di lino.

***Fig.4.10*** *tessuto Biotex Flax 3x3 Twill 420 g/m$^2$*

***Fig.4.11*** *Immagine al microscopio ottico (200x) delle fibre del Biotex in cui si nota che le fibre non sono ritorte*

Le fibre naturali sono corte e per essere filate devono essere raggruppate e, normalmente, ritorte per assicurare l'aderenza delle une verso le altre, così da dare le loro caratteristiche di resistenza al filo, ma ciò comporta un orientamento delle fibre che non è parallelo alla direzione dei filati, determinando una riduzione dell' efficienza di rinforzo delle fibre (percentuale reale di rinforzo in una direzione inferiore rispetto a quella apparente) che può essere in qualche modo tenuto in considerazione e quantificato nel fattore di orientazione all'interno dei modelli previsionali.

Le fibre Biotex, invece, hanno la peculiarità di essere *Twistless*, ossia il filato è creato senza ritorsione delle fibre. In tal modo, il costruttore dichiarano fino al 50% di miglioramento rispetto alle altre fibre ritorte, nei compositi fibrorinforzati, così da rendere gli ecompositi adatti per l'impiego in applicazioni strutturali o semistrutturali.

***Tab. 4.4*** *Caratteristiche del tessuto Biotex*

| ***Proprietà feltro*** | | |
|---|---|---|
| ***Caratteristica*** | ***Valore*** | ***U.d.m.*** |
| *Peso medio per unità di superficie* | 420 | $g/m^2$ |
| *Larghezza rullo* | 1,25 | m |
| *Configurazione tessuto* | *3x3 Twill* | |
| ***Costo*** | ***4,25*** | $\$/m^2$ |

# 4.4.1.2 MATRICE

La resina impiegata è una termoindurente di natura epossidica basata sul diglicidil-etere del bisfenolo A (BADGE). Il nome commerciale è *Prime 20LV* ed è prodotta dall'azienda multinazionale Gurit Ltd.

Viene condotta a reticolazione mediante un catalizzatore amminico denominato *Prime 20 LV slow hardner*, fornito dalla stessa azienda. La resina è adatta per tutti i processi di infusione, in quanto, possiede una viscosità molto bassa e un tempo di lavorazione lungo, che la rende ideale per l'impregnazione, in una sola operazione, di manufatti molto grandi e complessi. Il picco esotermico è particolarmente basso, ciò permette di realizzare anche sezioni molto spesse senza il rischio di gelificazione

prematura a causa del calore sprigionato dalla reazione esotermica. Tale caratteristica permette pure di prolungare la vita degli stampi.

Il processo di *curing* avviene a circa 50°C e permette di raggiungere una completa reticolazione.

Il sistema PRIME™ 20LV è disponibile con tre catalizzatori, offrendo una gamma di tempi di lavoro e velocità di reticolazione consoni alle più svariate esigenze. Possiede inoltre buone proprietà adesive con supporti vinilesteri.

Si riportano nel seguito alcune caratteristiche dei componenti della miscela di reazione tratte dalla scheda tecnica del produttore.

***Tab. 4.5*** *Proprietà dei componenti della miscela di reazione*

| | LV Resin | Hardener | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Fast | Slow | Extra Slow |
| **Mix Ratio by Weight** | 100 | 26 | 26 | 26 |
| **Mix Ratio by Volume** | 100 | 31.4 | 31.4 | 31.4 |
| **Viscosity @20°C (cP)** | 1010-1070 | 25-27 | 22-24 | 16-18 |
| **Viscosity @25°C (cP)** | 600-640 | 20-22 | 15-17 | 13-15 |
| **Viscosity @30°C (cP)** | 390-410 | 16-18 | 12-14 | 10-12 |
| **Shelf Life (months)** | 12 | 12 | 12 | 12 |
| **Colour (Gardener)** | 1 | 7 | Clear | 1 |
| **Mixed Colour (Gardener)** | - | 3 | 1 | 1 |
| **Density (g/cm$^3$)** | 1.123 | 0.983 | 0.936 | 0.931 |
| **Mixed Density** | - | 1.089 | 1.084 | 1.083 |

La miscela di reazione deve essere preparata con molta cura e deve rispettare le indicazioni sulle proporzioni dei componenti fornite dal produttore.

Resina e catalizzatore vanno mescolati con particolare attenzione per evitare che all'interno del recipiente si creino delle zone in cui c'è una maggiore concentrazione di catalizzatore. La reazione, infatti, inizia immediatamente, producendo un calore molto intenso; ciò accelera la reazione e la rende potenzialmente incontrollabile.

Per ottenere l'optimus delle proprietà meccaniche bisogna sottoporre la miscela di reazione ad un ciclo termico. I tempi minimi di curing (reticolazione) consigliati dal produttore sono indicati in tabella 4.6. I valori

suggeriti sono stati comunque testati in condizioni reali di applicazione prima di procedere alla realizzazione dei compositi.

***Tab. 4.6*** *Tempi minimi di curing in funzione della temperatura*

| **Temperatura [C°]** | **Tempo di curing minimo [h]** |
|---|---|
| **65** | 7 |
| **50** | 16 |

Si può comunque prevedere una fase di pre-curing ad una temperatura leggermente superiore a quella ambiente (35-45°C), la successiva sformatura ed una fase di post reticolazione alle temperature prima indicate.

In tabella 4.7 sono indicate le proprietà di lavorabilità tratte dalla scheda tecnica del produttore.

***Tab. 4.7*** *Caratteristiche di lavorabilità della resina Prime 20 LV*

| | Fast Hardener | | | | Slow Hardener | | | | Extra Slow Hardener | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 15°C | 20°C | 25°C | 30°C | 15°C | 20°C | 25°C | 30°C | 15°C | 20°C | 25°C | 30°C |
| Initial Mixed Viscosity (cP) | 535-568 | 318-338 | 219-232 | 127-134 | 564-598 | 308-326 | 214-228 | 172-182 | 662-702 | 347-369 | 220-234 | 155-165 |
| Geltime – Tecam 150g in water (hr : min) | 1:30 | 1:09 | 0:30 | 0:17 | 6:20 | 5:00 | 3:20 | 2:20 | 13:30 | 10:20 | 8:00 | 6:15 |
| Pot life 500g in air (hr : min) | 0:35 | 0:28 | 0:23 | 0:16 | 1:30 | 1:15 | 1:00 | 0:45 | 7:55 | 6:00 | 4:05 | 2:10 |
| Latest flow under vacuum (theoretical, thin film, hr : min) | 3:50 | 3:10 | 2:40 | 1:50 | 6:00 | 5:20 | 4:50 | 4:10 | 13:00 | 10:50 | 8:50 | 6:40 |
| Earliest vacuum off time (theoretical thin film) (hr : min) | 5:10 | 4:15 | 3:20 | 2:15 | 8:20 | 7:30 | 6:30 | 5:50 | 18:10 | 15:10 | 11:30 | 8:50 |
| Demould time (hr : min) | 9:00 | 6:45 | 5:00 | 2:30 | 25:00* | 21:00* | 15:30* | 11:50* | 115:00* | 88:00* | 50:00* | 28:00* |

Nel seguito sono riportate alcune delle proprietà di lavorabilità in funzione della temperatura

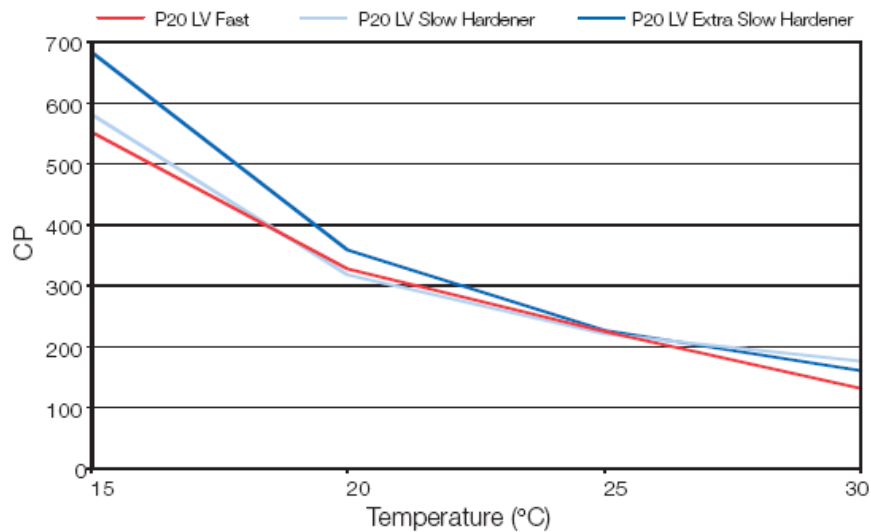



***Fig.4.12*** *Viscosità iniziale della miscela resina-catalizzatore*

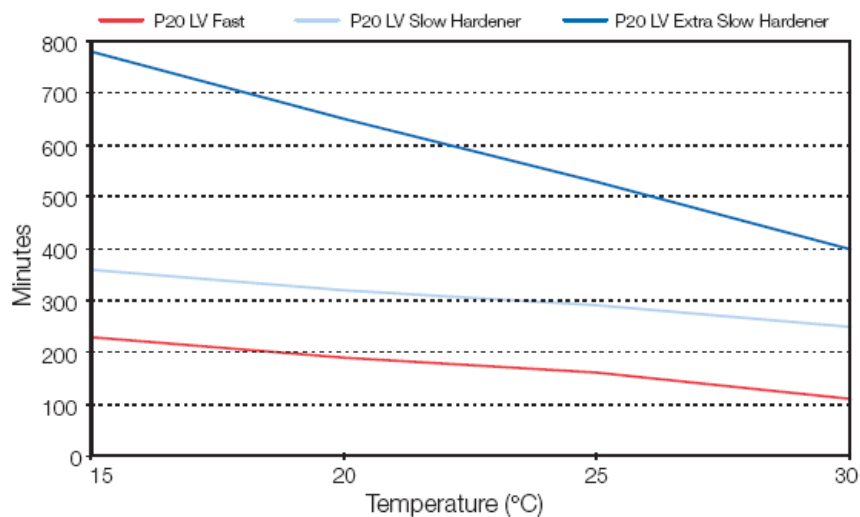



***Fig.4.13*** *Tempo di lavorabilità per iniezione sotto vuoto*

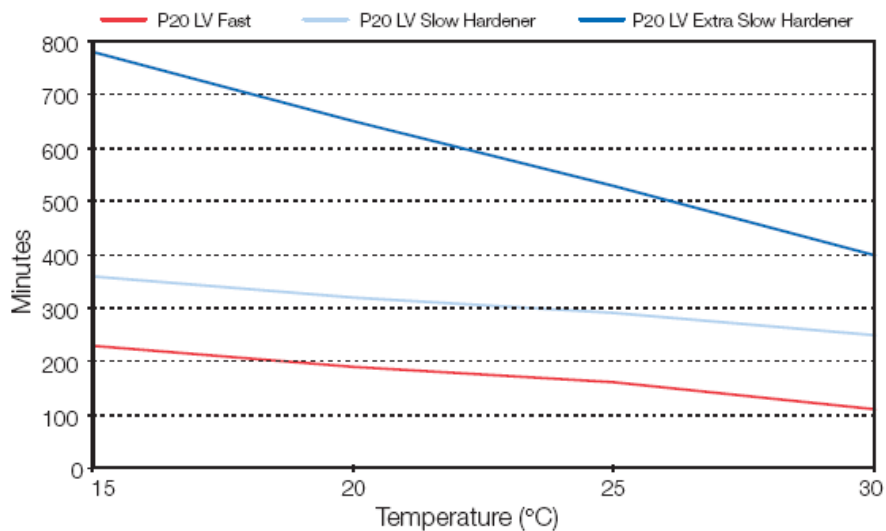



***Fig.4.14*** *Tempo minimo (teorico) per la sformatura del manufatto*

## 4.4.2 METODI: PROVE SUI MATERIALI BASE E SUI COMPOSITI

### 4.4.2.1 CARATTERIZZAZIONE DELLE FIBRE: DENSITÁ E PROPRIETÁ A TRAZIONE

Le proprietà fisiche e meccaniche delle fibre o dei filati di cui sono costituiti i rinforzi generalmente non vengono fornite dal produttore, come nel caso del Mat, dei tessuti EnviroTextiles e CompositesEvolution, per cui è stato necessario effettuare delle prove densimetriche e di trazione, utili per la progettazione prima e la caratterizzazione dopo dei compositi realizzati.

Con la prova densimetrica, in particolare, si determina la densità delle fibre in modo da poter calcolare, come esplicato nel seguito della trattazione, la percentuale in volume di fibra nel composito, dato di assoluta importanza per valutare le proprietà fisiche e meccaniche di un manufatto.

La procedura adottata consiste nel prendere qualche grammo di tessuto che, dopo essiccazione in forno per almeno 2 ore, viene tagliato finemente fino ad ottenere una sorta di "polvere" di tessuto che viene successivamente posta all'interno del cilindro di una pasticcatice. La polvere così ottenuta viene compattata per mezzo di una pressa idraulica ad una forza di 12 t. In questo modo si ottiene un cilindretto di diametro pari a 13 mm costituito da fibre compattate, riducendo al minimo la presenza di aria tra le fibre che viene espulsa attraverso uno sfiato posto sul fondo della pasticcatice. Ovviamente la pressione esercitata non riesce ad eliminare completamente i vuoti a causa della frazione costituita dal lumen interno alle fibre. Il cilindretto viene, quindi, pesato su una bilancia di precisione alla quarta cifra decimali e successivamente misurato con un micrometro; dalle informazioni così ottenute si ricava la densità della fibra, utilizzando la seguente formula:

$$\rho = \frac{4w}{\pi D^2 h}$$

in cui
- w è il peso del cilindro
- D è il diametro del cilindro
- h è l'altezza del cilindro

***Fig.4.15*** *Tessuto polverizzato*

***Fig.4.16*** *Pasticcatrice e relativi accessori*

***Fig.4.17*** *Pressa utilizzata per compattare la fibra e particolare del manometro*

***Fig.4.18*** *Cilindro ottenuto dalla compattazione delle fibre*

Per quanto riguarda, invece, la misurazione della densità aerale, questa è stata calcolata come semplice rapporto tra il peso di un tessuto ed il volume da esso occupato. Considerando che la composizione chimica delle fibre è variabile è opportuno calcolare la densità aerale, come quella delle singole fibre, su un campione significato e mediare i valori.

La caratterizzazione meccanica a trazione delle fibre e dei filati dei tessuti utilizzati come rinforzo è consistita nel determinare il modulo E, la tensione massima σ e la deformazione ε a rottura delle fibre. A tale scopo sono state condotte una serie di prove a trazione utilizzando una macchina di prova tipo Zwick Roell con una cella di carico da 1 kN.

Per ottenere una caratterizzazione significativa dal punto di vista statistico, considerando che le fibre hanno una notevole variabilità di composizione chimica e di struttura fisica, quindi di proprietà meccaniche ad esse connesse, sono state condotte 50 prove di trazione su altrettante fibre o yarn di fibre estratte da ciascun tessuto.

Poiché la macchina di trazione a disposizione non consente di testare fibre di diametro dell'ordine della decina di micron, causa lo scorrimento della fibre lungo i morsetti, si è adottata una tecnica, ormai consolidata [93] che si è rivelata efficace anche nella circostanza attuale. La tecnica consiste nel ridurre i 50 campioni prelevati ad una lunghezza di circa 25 mm che successivamente vengono incollati ciascuno su un pezzo di carta di forma quadrata di lato 45 mm che all'interno ha un foro quadrato, di lati paralleli al perimetro esterno e di dimensioni pari a 15mm. Tali cornici hanno il duplice scopo di evitare il fenomeno del pull-out (l'attrito che si sviluppa tra le pinze e la carta non permettono invece tale scivolamento), ma anche quello di permettere un allineamento preciso della fibra rispetto all'asse della macchina.

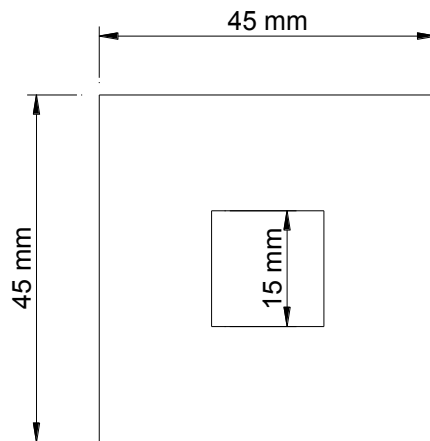



***Fig.4.19*** *Cornice di carta per la prova di trazione della fibra*

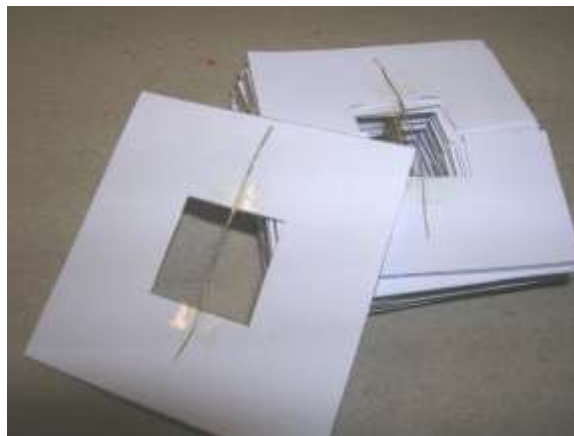



***Fig.4.20*** *Campioni pronti per il test a trazione*

L'adozione delle dimensioni su esposte ha un fondamento scientifico. Ipotizzando di avere una fibra di lunghezza indefinita, tagliando degli spezzoni di lunghezza diversa da sottoporre a prova di trazione, si osserverebbe in linea teorica una dipendenza della resistenza σ a trazione delle fibre dalla lunghezza delle stesse. In particolare la resistenza a trazione decresce al cerscere della lunghezza del campione, tendendo

asintoticamente ad un valore costante. Comunemente però nel mondo scientifico si ritiene rappresentativa del tipo di fibra la resistenza valutata su una lunghezza libera di 15 mm.

Posizionato il sistema cornice-fibra all'interno dei morsetti, questi ultimi vengono chiusi e i lati liberi della cornice vengono tagliati per svincolare le parti, superiore e inferiore, afferrate, lasciando, quindi, alla fibra il compito, in fase di trazione, di sostenere il carico.

***Fig.4.22*** *Prova di trazione di una fibra estratta dal Mat*

I campioni sono stati testati con una macchina di prova tipo Zwick Roell presso i laboratori del C.N.R. di Catania. Il test viene condotto a "spostamento controllato", ossia viene monitorato e mantenuto costante la velocità di allungamento della fibra/filato, quindi lo spostamento della traversa superiore (quella inferiore rimane ferma). La velocità di allungamento è stata mantenuta costante e pari a 1 mm/min. La prova ha termine quando la fibra giunge a rottura.

Il modulo elastico longitudinale rilevato e fornito dal software è quello corrispondente alla prima parte del diagramma in cui la fibra mostra un comportamento elastico. In particolare, Il modulo E è stato calcolato come la pendenza della retta tangente al diagramma sforzo-deformazione, in corrispondenza del punto di deformazione $\varepsilon_1$ pari allo 0,05%.

Il software registra inoltre la tensione massima e a rottura della fibra, calcolate a partire dalla forza rilevata dalla cella di carico e dal diametro delle fibre, considerate di sezione circolare, di volta in volta misurate grazie ad un micrometro di precisione.

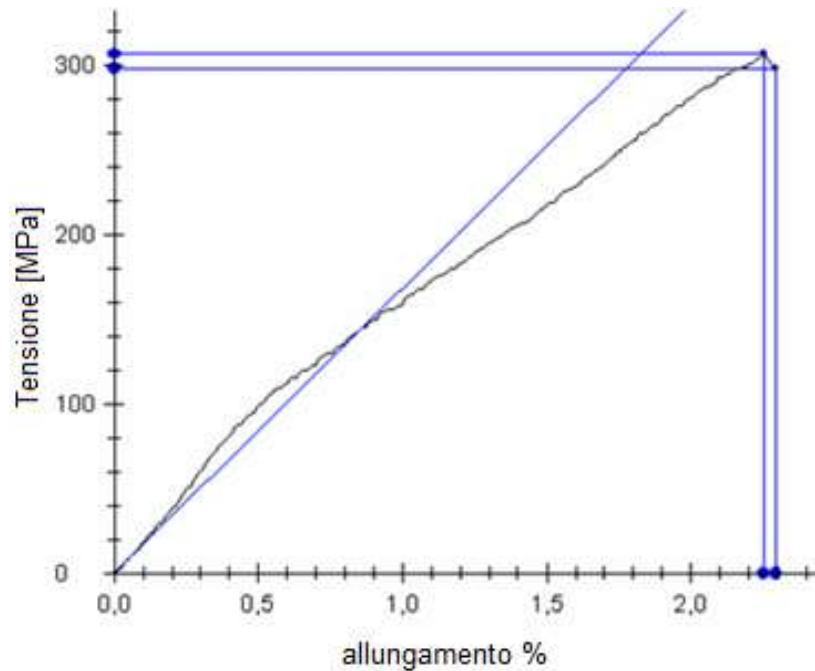



***Fig.4.21*** *Acquisizione del modulo elastico e della tensione massima e a rottura*

## 4.4.2.2 TRATTAMENTI SUPERFICIALI APPLICATI ALLE FIBRE

Il tentativo di raggiungere l'optimus delle proprietà fisico-meccaniche dei compositi non ha coinvolto solo la ricerca di un processo produttivo a basso costo e in grado di estremizzare la presenza del rinforzo nel materiale composito, ma anche di trattamenti chimici in grado di eliminare i problemi di interfaccia tra fibra e matrice, di cui si è ampiamente discusso nel capitolo 1. In tale capitolo si è accennato circa il successo riscontrato dai trattamenti con soda caustica – NaOH (mercerizzazione) e con agenti di accoppiamento, come gli amminosilani, che sono i trattamenti adottati nel presente studio. Questi ultimi sono indicati nel caso in cui, come nel presente, si ha a che fare con resine di natura epossidica con cui riescono a creare legami stabili di natura chimica. Nella fattispecie, la molecola utilizzata è commercializzata dall'azienda Sigma-Aldrich sotto il nome di A1100 e consiste nel 3-amminopropiltrietossisilano. Anche la soda caustica (NaOH) in forma di capsule è stata fornita dalla Sigma-Aldrich.

Tutti i trattamenti sono stati condotti presso i laboratori di chimica del D.I.I.M. su pezzi di tessuto di dimensioni utili per produrre compositi, al fine di simulare una procedura facilmente riproducibile su scala produttiva.

***Mercerizzazione***

Il trattamento con soda caustica (NaOH) è stato adottato con l'obiettivo di ridurre il diametro delle fibre, quindi, aumentare la superficie specifica di contatto con la matrice per effetto dell'eliminazione di alcuni componenti come la lignina e l'emicellulosa; eliminare le cere e gli oli presenti sulla superficie, ottenendo, quindi una superficie scabra che favorisce i legami fisici di dinterfaccia fibra-matrice; migliorare le proprietà meccaniche, a causa dell'eliminazione di una quota parte di sostanze amorfe cementanti (lignina ed emicellulosa), aumentando quindi la percentuale di cellulosa cristallina e di conseguenza la rigidezza della fibra.

Sulla base di evidenze sperimentali ducomentate in letteratura, ci si è limitati a percentuali di NaOH tali da garantire la non eccessiva estrazione di sostanze cementanti per non danneggiare le pareti cellulari.

Prima di procedere con il trattamento, i tessuti vengono pesati in condizioni di umidità naturale e successivamente messi ad essiccare in forno ad una temperatura costante di 70°C per eliminare l'umidità trattenuta dalle fibre. Periodicamente, il tessuto viene pesato, annotando il peso e valutando lo scarto con la pesata precedente. Quando lo scarto tra la due pesate consecutive è inferiore allo 0,1% del peso iniziale, i tessuti sono pronti per essere trattati.

Il trattamento consiste nell'immergere i tessuti in una soluzione acquosa di NaOH, alla concentrazione voluta, prestando attenzione che il rapporto volumetrico tra fibra e soluzione fosse di 1/50 (per il calcolo volumetrico della fibra, si rimanda al paragrafo immediatamente precedente).

I trattamenti non sono stati eseguiti su singole fibre, ma immergendo in soluzione il tessuto indiviso, in modo da sviluppare un metodo di trattamento industriale veloce.

Il trattamento dura circa un'ora, durante il quale la soluzione è mantenuta in agitazione mediante l'utilizzo di un agitatore magnetico. Trascorso tale periodo si passa alla neutralizzazione con una soluzione di acido acetico ($CH_3COOH$) misurando il pH con una cartina al tornasole fino ad ottenere il pH 7 (neutro). Ciò porta alla rimozione degli alcali che non hanno reagito. Una volta tirato fuori, ogni campione viene lavato in

abbondante acqua demineralizzata, asciugato fino ad ottenere un peso costante.

***Trattamento con amminosilano A1100 della Sigma-Aldrich***

Gli amminosilani, invece, sono degli agenti di accoppiamento che generalmente permettono di migliorare il grado di reticolazione nella regione dell'interfaccia tra fibra e matrice. Il trattamento consiste nell'innestare gruppi terminali reattivi sulle fibre, sfruttando i gruppi ossidrile della fibra, che possono reagire con la matrice di natura epossidica.

Generalmente, l'interazione dei silani con fibre naturali procede attraverso i seguenti passaggi:

1) Idrolisi: i monomeri di silano sono idrolizzati in presenza di acqua e catalizzatore (normalmente acido o base);
2) Auto-condensazione: durante il processo di idrolisi, prende luogo la condensazione concomitante di silanoli che deve essere ridotta al minimo, controllando il pH della soluzione;
3) Assorbimento: i monomeri silanoli reattivi vengono fisicamente adsorbiti dai gruppi idrossilici delle fibre naturali, con legami a idrogeno, sulle superfici delle fibre (superficie di rivestimento) e/o nelle pareti cellulari;
4) Innesto: in condizione di riscaldamento, i legami a idrogeno tra i silanoli e i gruppi ossidrilici delle fibre possono essere convertiti in legami covalenti.

Poiché uno dei passi fondamentali che determina il buon esito del trattamento (riscontrabile in termini di proprietà meccaniche nei compositi che sono stati realizzati) è la fase 3, ossia l'assorbimento dei silanoli, il trattamento con silani è stato eseguito su tessuti precedentemente trattati con soda caustica per incrementare il numero di gruppi idrossilici delle fibre naturali.

Prima di procedere con il trattamento, i tessuti vengono pesati in condizioni di umidità naturale e successivamente messi ad essiccare in forno ad una temperatura costante di 70°C per eliminare l'umidità trattenuta dalle fibre. Periodicamente, il tessuto viene pesato, annotando il peso e valutando lo scarto con la pesata precedente. Quando lo scarto tra la due

pesate consecutive è inferiore allo 0,1% del peso iniziale, i tessuti sono pronti per essere trattati.

Il trattamento consiste nell'immergere i tessuti in una soluzione acquosa di 3-amminopropiltrietossisilano (A1100) corretta con acido acetico per portarne il pH a valori compresi tra 4 e 5 per garantire massima reattività dei silani in soluzione.

I trattamenti non sono stati eseguiti su singole fibre, ma immergendo in soluzione il tessuto indiviso, in modo da sviluppare un metodo di trattamento industriale veloce.

Il rapporto volumetrico tra fibra e soluzione viene fissato a 1/50. I tessuti vengono tenuti immersi per circa un'ora nella soluzione; quest'ultima è mantenuta in continua agitazione grazie all'uso di un agitatore magnetico. Al termine del trattamento si procede alla neutralizzazione della soluzione con soda caustica, fino ad ottenere pH 7, e al lavaggio dei campioni con acqua demineralizzata. Dopo la successiva asciugatura i campioni vengono pesati per monitorare la perdita/incremento di peso.

#### 4.4.2.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA RESINA : DENSITÁ, PROPRIETÁ MECCANICHE A TRAZIONE E VISCO-ELASTICHE A FLESSIONE

Prima di procedere con la realizzazione dei laminati compositi, sono state determinate le proprietà di interesse della resina utilizzata, PRIME 20 LV. In particolare sono state eseguite delle prove di densità, di caratterizzazione meccanica a trazione e flessione su tre punti.

Le prove densimetriche e di trazione, si sono rivelate utili per la progettazione prima e la caratterizzazione dopo dei compositi realizzati.

La determinazione della densità è stata condotta mediante il metodo della pesata idrostatica, ossia un campione di resina significativo, reticolata a 50° C per 20 ore, viene ridotto in scaglie di dimensioni sufficientemente piccole da poter entrare in una colonna graduata riempita con acqua distillata fino ad un livello noto. Annotato il peso prima e dopo l'immersione, si riporta il volume di acqua distallata della colonna a quello originario. Conoscendo la densità dell'acqua distillata alla temperatura di prova (T=25°C - $\rho_{H2O\ distillata}$= 1,001176 g/cm$^3$), per differenza di peso e sfruttando il principio di Archimede, si ottiene il volume di resina come rapporto:

$$V_{resina} = \frac{w_{acqua\ spostata}}{\rho_{H2O\ distillata}}$$

Dal rapporto tra il peso e il volume di resina, si ottiene, quindi, la densità.

***Fig.4.22*** *Alcune fasi della prova per determinare la densità della resina*

Per la caratterizzazione meccanica della resina sono state effettuate una serie di prove di trazione. La preparazione dei provini è stata fatta partendo da una lastra ottenuta per colata in uno stampo e reticolata a 50°C in forno per un tempo di 20 ore.

***Fig.4.23*** *Lastra di resina PRIME 20 LV, reticolata a 50°C per 20 ore*

Per poter operare un confronto diretto di proprietà meccaniche con i compositi fibro-rinforzati che sono stati realizzati, sono state ricavate dalla lastra delle provette identiche per tipo, forma e dimensioni, a quelle per i laminati fibro-rinforzati (UNI EN ISO 527), come indicato nella seguente figura.

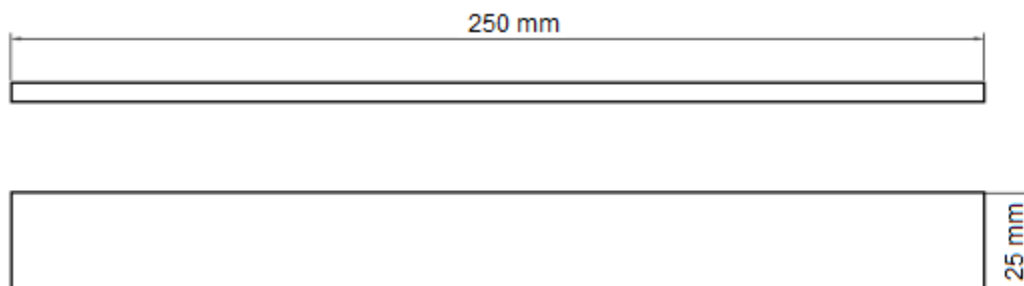



***Fig.4.24*** *Dimensioni della provetta di resina per la prova di trazione*

Le provette sono state testate con una macchina di prova tipo Zwick Roell presso i laboratori del C.N.R. di Catania, equipaggiata con una cella di carico da 50 kN. Le prove sono state condotte con un precarico di 5N imponendo una velocità di deformazione costante pari a 2 mm/min. La distanza tra i morsetti è stata regolata in maniera da avere una lunghezza libera di 150 mm.

Per la caratterizzazione a flessione e per lo studio del comportamento visco-elastico della resina sono state condotte delle prove dinamo-meccaniche (DMA) presso i laboratori di chimica del D.I.I.M. della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Catania utilizzando una macchina DMA tipo Tryton tecnolgy modello D6001.

In particolare, i provini sono stati sollecitati a flessione su tre punti, imponendo una deformazione periodica sinusoidale di ampiezza pari a 0,05 mm, a frequenza variabile (1 e 10 Hz alternativamente), per osservare il comportamento del polimero sottoposto a sollecitazioni dinamiche e al variare della velocità di deformazione (comportamento viscoso). E' importante sottolineare che con tale strumento non si porta a rottura il provino, ma si sollecita entro il campo di deformazione elastica. La prova ha termine quando si raggiunge la temperatura limite imposta.

La prova è avvenuta in condizioni di temperatura variabile, all'interno dell'intervallo 25-140°C, con incrementi di 2°C/min, per determinare, inoltre, la temperatura di trasizione vetrosa $T_g$, indispensabile parametro per

stabilire di fatto la massima temperatura di esercizio di un materiale composito polimerico.

I provini di forma parallelepipeda sono stati ricavati da una lastra di resina ottenuta per colata in uno stampo di PVC e reticolata per 20 ore a 50°C . Le dimensioni dei campioni testati sono quelle indicate in figura (come indicato dalla norma ASTM D4065 – 01). Lo spessore massimo dei provini non deve superare i 7 mm.

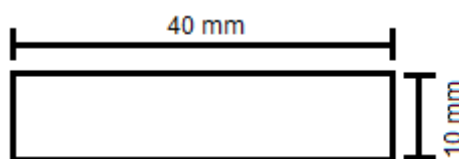



***Fig.4.25*** *Dimensioni della provetta di resina per la prova DMA*

## 4.4.3 METODI: PRODUZIONE DEI COMPOSITI

I compositi innovativi, oggetto della presente tesi, sono stati prodotti utilizzando due tecnologie produttive, appartenenti alla categoria dei processi a stampo chiuso, ossia il Resin Transfer Molding (RTM) e il Bag Molding seguito da una fase di reticolazione in pressa riscaldata.

I due processi sono simili, in quanto, prevedono l'impiego di uno stampo su cui adagiare il materiale di rinforzo, ma differiscono per il controstampo che nel caso del RTM è rigido e dello stesso materiale dello stampo, mentre per il Bag Molding, come suggerisce il termine stesso, è costituito da una pellicola in materiale plastico di piccolo spessore.

I due processi non stati adottati simultaneamente, ma in fasi consecutive dettate dall'esigenza di incrementare la frazione volumetrica delle fibre nel composito, a parità di qualità del manufatto e di r*ange* di frazione volumetrica di vuoti nel materiale.

Nel corso della prima fase sono stati realizzati dei compositi con la tecnica del RTM, nella seconda con il Bag Molding in combinazione con la successiva fase di reticolazione sotto pressa per 20 ore a temperatura controllata (50°C). Il motivo per cui il processo di Bag Bagging è stato modificato sta, nel fatto che, sebbene il processo base permette di ottenere compositi di ottima qualità, in termini di finitura superficiale su una faccia e bassa percentuale di vuoti nel pezzo finito, non garantisce, al contrario,

elevate percentuali di rinforzo nel composito. Come è stato ampiamente trattato nel capitolo 3, il rapporto rinforzo/matrice risulta determinante per le proprietà meccaniche del materiale: più elevato è il rapporto, più elevate sono le proprietà meccaniche a trazione, per cui eliminando, in modo controllato, la resina in "eccesso" si aumenta il rapporto fibra/matrice.

Il principio potrebbe essere applicato anche al RTM, ma le pressioni sviluppabili con la pressa utilizzata sono nettamente superiori a quelle generabili con il serraggio mediante bulloni dello stampo rigido del dispositivo RTM in dotazione al D.I.I.M..

Come già ampiamente discusso nel capitolo 3, la differenza fondamentale tra le due tecniche di base consiste evidentemente nella tecnologia di trasferimento di resina che per il RTM è un'iniezione in pressione, mentre per il Bag Molding è innescata dal vuoto creato attraverso lo stampo. C'è da dire che il RTM in genere è favorito dal vuoto creato all'interno dello stampo che si aggiunge alla pressione relativa esercitata sul sistema e permette la sottrazione dell'aria intrappolata nei pori del tessuto e nella miscela resinosa.

I compositi sono stati prodotti presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica (DIIM) della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Catania e quelli dell'Istituto di Chimica e Tecnologia dei Polimeri (ICTP) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) della sezione di Catania.

#### 4.4.3.1 RESIN TRANSFER MOLDING

La macchina di iniezione impiegata è una Hypaject III che permette l'iniezione di resina, già miscelata col catalizzatore, a temperatura e pressione controllata. L'omogenizzatore, infatti, è un serbatoio metallico che può essere portato alla temperatura e pressione voluta (entro certi intervalli) per ottenere le migliori proprietà della resina.

***Fig.4.26*** *Macchina per il RTM (Hypaject III) in dotazione al D.I.I.M.*

Il ciclo di produzione è stato articolato nelle fasi seguenti:

- pulitura dello stampo;
- applicazione dell'agente distaccante;
- posizionamento dei tessuti di rinforzo;
- chiusura e bloccaggio dello stampo;
- iniezione o trasferimento della resina;
- polimerizzazione della stessa;
- apertura dello stampo ed estrazione del pezzo;
- operazioni di finitura.

Le fasi di "pulitura dello stampo" e "applicazione dell'agente distaccante" rientrano nella macrocategoria della "Preparazione dello stampo". E' una fase cruciale da cui dipende la qualità del pezzo finito e la possibilità di estrazione del pezzo, soprattutto se di geometria complessa.

Lo stampo deve essere perfettamente pulito, il canale di adduzione e di sfiato devono essere liberi da eventuali occlusioni. La pulitura dello stampo, si può ottenere con una soffiatura ad aria compressa, in combinazione con

l'uso di un raschietto, per rimuovere, i residui di gel-coat e/o di resina sullo stampo. Ovviamente, per non danneggiare la superficie perfettamente liscia dello stampo, tale raschietto deve essere meno duro del materiale su cui sarà applicato, quindi, nel caso oggetto di studio, essendo questo di acciaio, il raschietto può essere di legno duro, materiale termoplastico, rame od ottone. In taluni casi, anche se è preferibile evitare, si possono utilizzare solventi come l'acetone o il cloruro di metilene.

Dopo avere proceduto alla pulizia, sullo stampo viene versato un sottile strato di agente distaccante di natura sintetica, allo stato liquido (può essere usato anche un distaccante pastoso a base di cera), fino al completo ricoprimento delle superfici che entreranno a contatto con la resina; dopo qualche minuto la fase liquida del distaccante evapora, depositando sulle superfici un sottile film che non lega chimicamente con il materiale dello stampo e che quindi garantirà lo stacco tra quest'ultimo ed il pezzo finito.

La scelta del distaccante è comunque legata anche al tipo di resina utilizzata, dalla temperatura di processo, oltre che dalla finitura superficiale che si vuol ottenere. L'applicazione dei distaccanti può non essere ripetuta in ogni ciclo, ma l'effetto può durare fino alla produzione di numerosi pezzi consecutivi.

Quando si vuole garantire un elevato grado o un particolare finitura al manufatto realizzato si può depositare sopra lo strato di distaccante un film di gel-coat che costituirà lo strato superficiale del prodotto finito. In genere, il gel-coat è costituito da una resina termoindurente piuttosto dura (poliestere, epossidica o vinilestere), in modo da fornire un efficace rivestimento protettivo per il componente composito. L'adozione di questo strato dà alcuni vantaggi, come una maggiore resistenza all'idrolisi, alla corrosione e in generale, all'invecchiamento, ma aumenta considerevolmente i tempi di produzione, che dipendono dal raggiungimento dello stato di gelificazione da parte di tale resina, prima che possa continuare il ciclo. Il problema potrebbe essere by-passato velocizzando il processo di deposizione, attraverso un riscaldamento dello stampo oppure utilizzando più stampi contemporaneamente (soluzione più costosa). A volte si può passare uno strato ulteriore, prima del gel-coat, in modo da renderlo impermeabile, sigillandone i pori e le micro irregolarità,

cosi da renderlo lucido e liscio, permettendo al prodotto finito di conservarsi più a lungo e permettendo una pulitura più facile.

Poiché il raggiungimento di un elevato livello estetico dei compositi prodotti non rientra tra gli obiettivi del presente lavoro di tesi, ci si è limitati ad ottenere un sufficiente grado di finitura superficiale (superfici piane, lisce e prive di cavità), non applicando alcun gel-coat, ma semplicemente l'agente distaccante citato in precedenza.

Il posizionamento dei tessuti di rinforzo nella cavità dello stampo, prevede, ovviamente il taglio degli stessi in dimensioni e forme adeguate. Nella fattispecie, i tessuti sono stati tagliati in quadrati da 400 x 400 mm e asciugati in forno a 70°C per circa due ore. Questo elimina parte dell'acqua contenuta nelle fibre; l'acqua è un plasticizzante per le fibre vegetali ed inoltre poco si compatibilizza con la natura idrofoba della matrice.

Il rinforzo precedentemente preformato e asciugato in forno, va pesato prima di essere posizionato all'interno dello stampo. Il posizionamento per sovrapposizione può costituire una fase laboriosa se lo stampo ha geometria complessa e il tessuto non è sufficientemente soffice per natura delle fibre o disposizione delle fibre. Nel presente studio, poiché si utilizza uno stampo piano, non è stata riscontrata alcuna problematica relativa alla disposizione dei tessuti nella cavità dello stampo. L'unico accorgimento da adottare riguarda la rifilatura dei tessuti al contorno, per evitare che, in seguito all'applicazione di una pressione da parte del controstampo, la dilatazione dei tessuti in direzione trasversale alla pressione possa fare in modo che parte del rinforzo vada a finire nella zona perimetrale, annullando la tenuta della cavità dello stampo verso l'esterno, riducendo, quindi, la capacità del sistema di creare il vuoto ausiliario, utile a ridurre la presenza dei vuoti all'interno del pezzo finito.

Il posizionamento riguarda non solo il rinforzo, ma anche eventuali inserti o il core dei sandwich.

Ciò che è comunque indispensabile è l'uniformità della distribuzione delle fibre senza raggrinzamenti, pieghe, increspature, variazioni di spessore non volute, ripiegamenti.

Posizionati i tessuti ed eventualmente la sequenza tessuti/core material/tessuti per la produzione d'un pezzo dei materiali sandwich, si può posizionare il controstampo sullo stampo e, quindi, procedere al serraggio dei bulloni che terranno unite le due parti. Lo stampo dovrà resistere alla

pressione dell'operazione d'iniezione ed alla polimerizzazione, quindi la chiusura del controstampo viene effettuata con morse, bulloni od altri sistemi capaci bloccarlo con la forza sufficiente.

***Fig.4.27*** *Posizionamento dei tessuti all'interno della cavità dello stampo metallico*

***Fig.4.28*** *Zona di iniezione e punti di fuoriuscita della resina all'interno della cavità dello stampo*

Una volta chiuso lo stampo e raccordati i vari canali con la trappola si innesta la valvola di iniezione nel relativo alloggiamento posto nello stampo. A questo punto è necessario effettuare una verifica della tenuta del vuoto dello stampo: qualora non fosse perfetta si correrebbe il rischio, in fase di iniezione, di avere delle fuoriuscite di resina dallo stesso o peggio delle infiltrazioni d'aria che influiranno sulla qualità del manufatto.

Successivamente si passa al collegamento elettrico necessario al funzionamento delle resistenze che riscaldano lo stampo e della termocoppia che ne controlla la temperatura.

***Fig.4.29*** *Macchina RTM in fase di iniezione*

Verificato che tutto funziona correttamente, si prepara in batch la miscela resina epossidica Prime 20 LV e catalizzatore nel rispetto del rapporto 100/26 in peso.

A questo punto, la resina già miscelata viene caricata all'intermo dell'omogenizzatore del sistema RTM, fatta degasare per mezzo dell'applicazione di una prezzione relativa negati va al suo interno e portata alla temperatura voluta. Dopo qualche minuto, per essere sicuri dell'assenza di bolle d'aria intrappolate nella resina, si annulla il vuoto nell'omogenizzatore e si procede con l'iniezione all'interno dello stampo per mezzo di due canali posti lungo un lato dello stesso.

La pressione di iniezione è stata fatta variare all'interno dell'intervallo 1,1-1,6 bar in dipendenza del grado di compattazione dei tessuti (dipende dal numero dei tessuti utilizzati e dalla coppia di serraggio), determinante sulla permeabilità dei tessuti, e della velocità di iniezione che dipende dalla loro permeabilità.

L'operazione di iniezione è stata agevolata, almeno nella fase iniziale, applicando un pressione relativa negativa all'interno dello stampo che permette, inoltre, di eliminare le bolle d'aria intrappolate nei pori delle fibre e tra le fibre stesse. La depressione ausiliaria viene eserciata grazie ad un canale che si innesta esattamente al centro della superficie del controstampo posto nella parte più elevata.

La quantità di resina iniettata è stata sempre superiore al volume dello stampo (tale eccesso è quantificato tra il 5% ed il 20%), por essere sicuri della completa impregnazione dei tessuti. La fase di iniezione si conclude quando si vede in modo continuo la resina dai due canali posti agli antipodi dei punti di iniezione della resina. Ciò dovrebbe assicurare che la cavità si sia riempita completamente.

A riempimento avvenuto, prima vengono chiuse le valvole dei condotti di deflusso della resina e poi quelli d'ingresso, ottenendo un afflusso addizionale, detto pumping-up, che incrementa la pressione e previene dalle contrazioni, quindi, permette migliori corrispondenza dimensionale e finitura superficiale.

Terminata la fase di iniezione è fondamentale procedere con l'espulsione della resina in eccesso e con la pulizia dell'omogenizzatore, del condotto di iniezione e della valvola di iniezione. La pulizia viene effettuata facendo circolare dell'acetone all'interno del circuito di iniezione.

Per quel che riguarda i tempi di polimerizzazione, sono stati rispettati i tempi indicati sulla scheda tecnica del produttore di resina, ossia tutti i pezzi sono stati fatti reticolare all'interno dello stampo alla temperatura di 50°C per 20 ore. La reticolazione all'interno dello stampo ha anche evitato la formazione di ritiri indesiderati.

Dopo 20 h si spengono le resistenze che riscaldano lo stampo e si può procedere alla sformatura del manufatto. Una volta rimosso il controstampo il pezzo può essere facilmente staccato dallo stampo facendo leva con delle palette di plastica.

Poiché la forma del pezzo è semplice, l'estrazione è avvenuta facendo leva con un cuneo di materiale polimerico per evitare di danneggiare la planarità dello stampo.

Infine il pezzo è stato rifinito con una smerigliatrice orbitale a disco diamantato eliminando le protuberanze dovute ai fori, d'ingresso e di uscita, e le frange lasciate dal punto di contatto tra stampo e controstampo.

Seguendo questa procedura sono state ottenute laminati di forma quadrata di lato pari a 400 mm, come mostrato nella seguente figura (a sinistra una lastra rinforzata con il Mat, a destra con il tessuto B6240C).

***Fig.4.30*** *Laminati in composito rinforzato con tessuto Mat (alto) e B6240C (basso)*

#### 4.4.3.2 BAG MOLDING-HOT PRESS CURING

Il ciclo di produzione è stato articolato nelle fasi seguenti:

- pulitura dello stampo;
- applicazione dell'agente distaccante;
- posizionamento dei tessuti di rinforzo;
- posizionamento della pellicola plastica e sigillazione dello stampo;
- trasferimento della resina;
- posizionamento dello stampo sotto pressa a temperatura e applicazione della pressione di compattazione;
- polimerizzazione della resina;
- apertura dei piatti della pressa ed estrazione dello stampo;
- rimozione del composito dallo stampo;
- operazioni di finitura.

Le fasi di "pulitura dello stampo" e "applicazione dell'agente distaccante" che rientrano nella macrocategoria della "Preparazione dello stampo" sono identiche a quelle descritte per il Resin Transfer Molding, per cui valgono le stesse considerazioni già enunciate. Anche nella circostanza attuale, tale fase rappresenta il punto critico da cui dipende la qualità del pezzo finito e la possibilità di estrazione del pezzo, soprattutto se di geometria complessa.

Il processo di Bag Molding è stato condotto adottando come stampo una lamina di alluminio piana di sufficiente spessore (2 mm) tale da garantire l'indeformabilità sia in fase di iniezione che in quella di reticolazione della resina.

Il posizionamento dei tessuti di rinforzo sullo stampo, prevede, il taglio degli stessi in dimensioni e forme adeguate. Nella fattispecie, i tessuti sono stati tagliati in quadrati da 200 x 180 mm e asciugati in forno a 70°C per circa due ore per eliminare la parte di acqua igroscopica dalle fibre.

***Fig.4.31*** *Preforme asciutte di tessuto Biotex*

Il rinforzo precedentemente preformato e asciugato in forno, va pesato prima di essere posizionato all'interno dello stampo. E' importante operare rapidamente in modo da non fare assorbire troppa umidità in questo passaggio.

Poiché lo stampo è piano, il posizionamento per sovrapposizione dei tessuti non è stata una fase laboriosa.

La chiusura dello stampo è stata realizzata mediante la posa di una membrana flessibile di poliestere, denominato in gergo "sacco da vuoto", resistente alle pressioni di esercizio e alle temperature di reticolazione. Il sacco viene sigillato contro la lamina di alluminio mediante la preventiva disposizione attorno alla preforma di tessuto di una gomma butilica. Durante l'applicazione allo stampo si deve fare attenzione nel non far arrivare il distaccante sul sigillante che per ovvie ragioni deve essere applicato su superfici perfettamente pulite ed asciutte. Inoltre, il sigillante deve aderire in modo da minimizzare la possibilità di creazione di canali verso l'esterno che possono determinare la perdita del vuoto creato.

***Fig.4.32*** *Fasi della preparazione dello stampo: posizionamento del sistema di distribuzione, del sigillante perimetrale e dell'agente distaccante sulla superficie*

***Fig.4.33*** *Fasi della preparazione dello stampo: posizionamento dei tessuti*

Lungo due lati paralleli del composito sono stati introdotti dei tubi flessibili in nylon di diametro pari a 4 mm terminanti all'interno della camera con un raccordo a T a cui sono stati collegati due diffusori. Questi tubi sono collegati l'uno con la pompa da vuoto, l'altro col serbatoio di resina catalizzata e sono intervallati da due valvole di regolazione della portata sia per interrompere la creazione del vuoto e quindi dell'infusione, sia per mantenere, a valvola chiusa, il vuoto creato.

***Fig. 4.34*** *Fasi della preparazione dello stampo: posizionamento del sacco da vuoto e prova della tenuta del vuota prima della fase di iniezione*

***Fig. 4.35*** *Configurazione finale del sistema per il Bag Molding*

Nella seguente figura si mostra il passaggio della resina e la registrazione dei tempi e delle distribuzioni di avanzamento. Grazie ai diffusori installati la resina segue un fronte di avanzamento uniforme e non appena giunge all'altra estremità del pannello le valvole vengono chiuse per dare fine all'infusione.

***Fig. 4.36*** *Una fase del processo di iniezione della resina, con l'annotazione del fronte di avanzamento nel tempo*

Una volta terminato il processo di infusione, mantenendo il vuoto all'interno del sacco, si pone lo stampo sotto la pressa, precedentemente portata a temperatura costante di 50°C, dove il composito viene lasciato reticolare per 20 ore. La pressione esercitata sui pannelli è stata variabile (0, 5, 10, 15, 25 Mpa) per studiare l'effetto della pressione di compattazione sulla percentuale in volume di rinforzo e, quindi, sulle proprietà meccaniche del materiale finito.

***Fig. 4.37*** *Pressa utilizzata per la fase di Hot Press Curing, a disposizione del ICTP del CNR di Catania*

***Fig. 4.38*** *Fase di pressaggio del laminato appena terminata l'infusione in Bag Molding*

A reticolazione ultimata, lo stampo viene estratto dalla pressa e il composito dallo stampo. Poiché la forma del pezzo è semplice, l'estrazione è avvenuta facendo leva con un cuneo di materiale polimerico per evitare di danneggiare la planarità dello stampo.

Infine, il pezzo è stato rifinito con una smerigliatrice orbitale a disco diamantato eliminando le protuberanze dovute alle zone di ingresso e di uscita della resina e le frange createsi per effetto dell'elevata compattazione da parte della pressa.

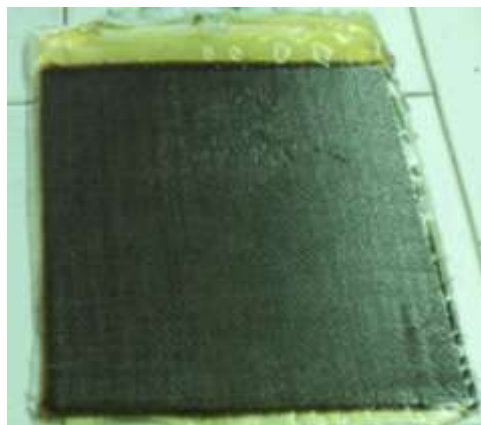



***Fig. 4.39*** *Laminato composito con tessuto Biotex appena rimosso dallo stampo, dopo la reticolazione sotto pressa*

## 4.4.4 CARATTERIZZAZIONE DEI COMPOSITI

### 4.4.4.1 VALUTAZIONE DELLE PROPRIETÁ FISICHE

I laminati ottenuti con i due processi produttivi, descritti in precedenza, sono stati caratterizzati dal punto di vista fisico, prima di ogni prova meccanica, al fine di determinare le percentuali in peso e volume dei componenti base. I dati cosi ottenuti permettono di valutare la rispondenza delle proprietà con il comportamento atteso, ottenuto mediante l'impiego di modelli previsionali.

A tal proposito, i bordi dei laminati ottenuti sono stati rettificati, eliminando eventuali sbavature, per ottenere un rettangolo di cui risultano facilmente misurabili i due lati. Sebbene i laminati vengono prodotti con processi che prevedono l'impiego di uno stampo e un controstampo paralleli, si è riscontrato il non perfetto parallelismo delle due facce e una certa rugosità superficiale che ha indotto a misurazioni multiple lungo tutti e quattro i lati del pannello. Lo spessore *c* del pannello è stato calcolato come media di 36 misurazioni effettuate lungo tutto il perimetro del laminato in altrettanti punti equidistanti.

Al fine di ricavare i rapporti volumetrici tra i costituenti di ogni lastra di composito sono stati, inoltre, rilevati il peso $W_c$ e le dimensioni a, b in pianta.

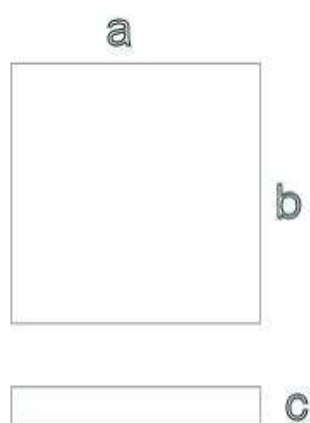



***Fig. 4.40*** *Schematizzazione del laminato e dimensioni geometriche*

La misurazione volumetrica dei compositi è stata effettuata anche mediante l'impiego di un picnometro, per avere maggiore attendibilità sui

dati determinati. Il principio sfrutta la conoscenza del volume contenuto dal picnometro, della temperatura e della densità dell'acqua distillata con cui lo strumento è riempito.

Grazie ad una serie di misurazioni di peso si riesce a risalire al volume del campione da analizzare.

In particolare, il metodo consta delle seguenti fasi:

1. Peso a vuoto del picnometro asciutto, compreso il tappo capillare, $W_{pc}$;
2. Peso del sistema riempito di acqua distillata a temperatura nota;
3. Peso del sistema asciutto e del campione in esso inserito;
4. Peso del sistema contenente il campione e colmato di acqua;

***Fig. 4.41*** *Picnometro impiegato per le misurazioni di volume*

Effettuando la differenza tra il primo peso $W_{pc}$ e il secondo si ottiene il peso della quantità massima di acqua che può contenere il picnometro $W_w$. Dalla fifferenza di peso tra la misurazione 4. e 3. si ottiene il peso di acqua che colma il volume lasciato libero dal campione all'interno del picnometro $W_{wn}$. Conoscendo il peso del campione $W_c$ , si può ricavare la misura della densità tramite la formula:

$$\rho_c = \frac{W_c \rho_w}{W_w W_{wn}} \quad \rightarrow \quad \rho_c = \frac{W_c}{\frac{W_w}{\rho_w} - \frac{W_{wn}}{\rho_w}}$$

Nel caso studio,  poiché le fibre vegetali sono fortemente idrofile, per evitare il problema dell' assorbimento di acqua, si è pensato di rivestire ciascun campione con della paraffina di densità nota. Il peso e il volume di paraffina impiegati sono stati tenuti in conto nei calcoli, considerando il sistema campione+paraffina come se fosse il nuovo campione in esame. Alla fine, tramite una banale differenza si è ottenuto il volume del solo campione di composito.

Per determinare il volume di un particolare composito, è stata fatta la media su 3 misurazioni eseguite su altrettanti  campioni, di dimensioni pari a circa  25x25 mm, estratti in modo casuale dal pannello, come in figura 4.42.

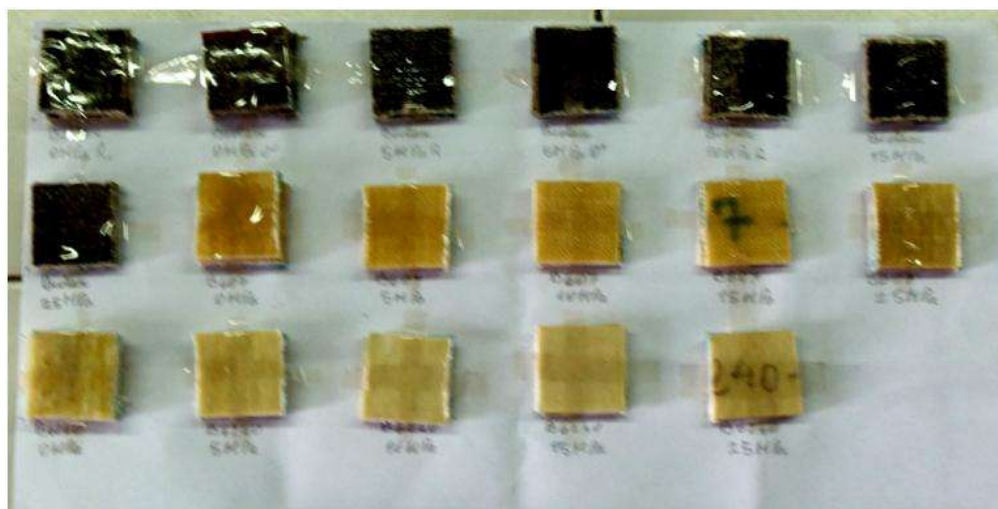



***Fig. 4.42*** *Campioni pronti per la prova densimetrica mediante picnometro*

A questo punto, conoscendo il peso ed il volume del composito, unitamente alla conoscenza della densità e del peso dei componenti in esso impiegati, si può facilmente risalire alle rispettive frazioni volumetriche utilizzando lo schema di calcolo presentato nel seguito.

Il peso del composito è dato da:

$$\mathrm{W_c = W_f + W_m}$$

Il peso della fibra $\mathrm{W_f}$ è un parametro noto, in quanto, corrisponde al peso del rinforzo che è stato inserito nello stampo.

Dalla percedente euqazione si può ricavare, quindi, il peso della matrice $W_m$

$$W_m = W_c - W_f$$

Ricordando che la densità ρ è definita come

$$\rho = \frac{W}{V}$$

grazie alla conoscenza delle densità dei costituienti, determinata propedeuticamente, si può facilmente risalire al volume assoluto dei singoli costituenti

$$V_f = \frac{W_f}{\rho_f}$$

$$V_m = \frac{W_m}{\rho_m}$$

Le frazioni volumetriche di fibra $v_f$ e matrice $v_m$ risultano quindi

$$v_f = \frac{V_f}{V_c}$$

$$v_m = \frac{V_m}{V_c}$$

Nel caso ideale di assenza di porosità la somma di $v_f$e di $v_m$dovrebbe essere 1; nel caso in esame, invece, una certa frazione del volume del composito  è occupata dai "vuoti" (nel senso che sono spazi non occupati ne dalla resina ne dal rinforzo, ma dall'aria) $v_p$. Risulta quindi:

$$v_c = v_f + v_m + v_p = 1$$

da cui si ricava

$$v_p = 1 - v_f - v_m$$

### 4.4.4.2 VALUTAZIONE DELLE PROPRIETÁ MECCANICHE A TRAZIONE

Per la caratterizzazione meccanica a trazione dei compositi sono state effettuate una serie di prove sperimentali. La preparazione dei provini è stata fatta partendo dai singoli laminati, ottenuti con i due processi produttivi, ricavando delle provette parallelepipede, secondo le dimensioni indicate nella norma UNI EN ISO 527-4 di cui si riporta un estratto per le provette di tipo 2, adatte ai compositi studiati.

| | | Dimensioni in mm |
|---|---|---|
| $L_3$ | Lunghezza totale | ≥ 250 |
| $L_2$ | Distanza tra i talloni | - |
| $b_1$ | Larghezza | (25 ± 0,5) o (50 ± 0,5) |
| $h$ | Spessore | da 2 a 10 |
| $L_0$ | Lunghezza del tratto utile (raccomandato per estensimetri) | 50 ± 1 |
| $L$ | Distanza iniziale tra i morsetti | 150 ± 1 |
| $L_T$ | Lunghezza dei talloni | - |
| $h_T$ | Spessore dei talloni | - |
| $D$ | Diametro dei fori di centratura | 3 ± 0,25 |

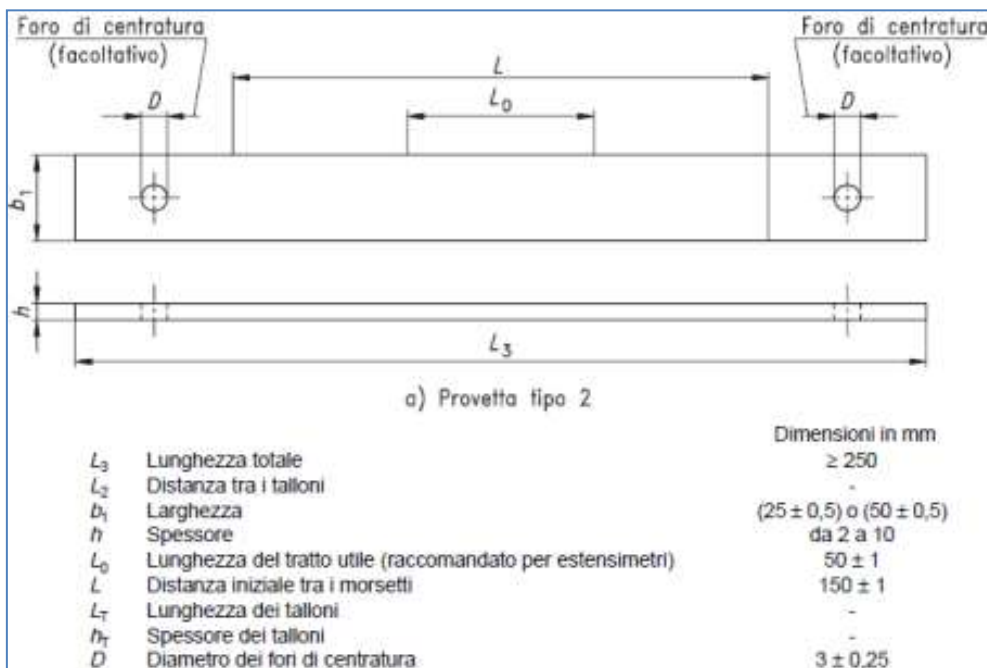



***Fig. 4.43 D****imensione e tolleranze dei provini secondo la UNI EN ISO 527-4*

In particolare, le dimensioni dei provini testati, confermemente a quanto consentino dalla norma, sono riportate nella seguente figura.

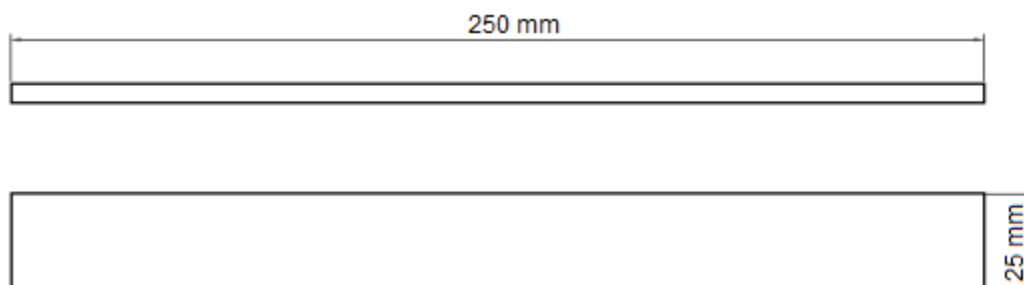



***Fig. 4.44*** *Dimensioni delle provette di composito per la prova di trazione*

Da ciascun laminato, mediante l'ausilio di una sega circolare diamantata, sono stati tagliati cinque provini, misurando in almeno 10 punti lo spessore del provino per confrontarlo con quello determinato nel corso della determinazione delle proprietà fisiche del composito.

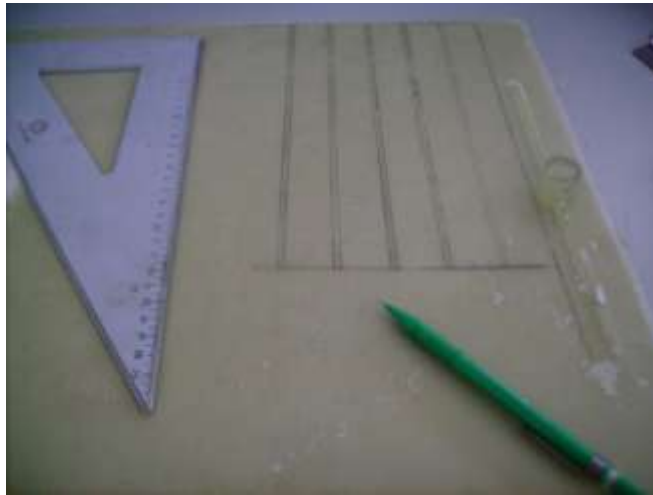



***Fig. 4.45*** *Traccia del contorno delle provette per la prova di trazione*

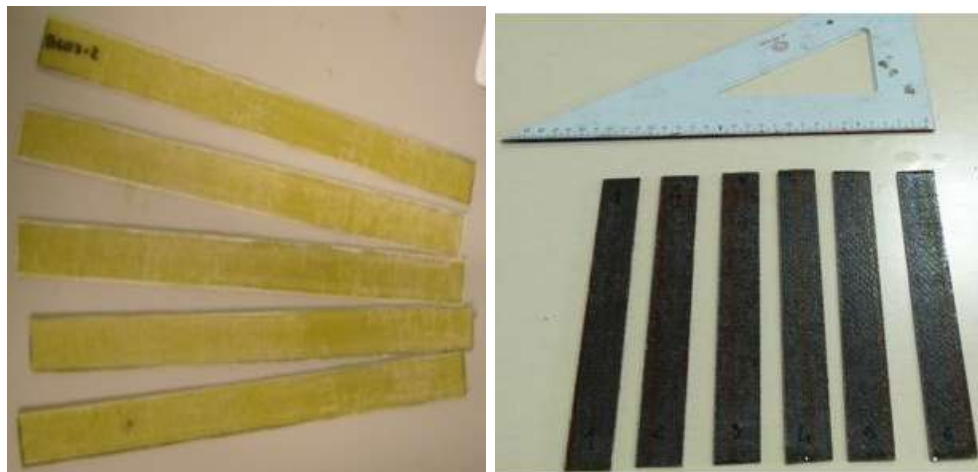



***Fig. 4.46*** *Alcuni provini sottoposti alla prova di trazione*

Le provette sono state testate con una macchina di prova tipo Zwick Roell presso i laboratori del C.N.R. di Catania, quipaggiata con una cella di carico di 50 kN. Le prove sono state condotte a spostamento controllato,con un precarico di 5N, imponendo una velocità di deformazione costante pari a 2 mm/min, come suggerito dalla norma UNI EN ISO 527-4. La distanza i morsetti è stata regolata in modo da avere una lunghezza

libera di 150 mm. In questo modo la parte di provino ammorsata risulta essere pari a 50 mm sia inferirmente che superiormente.

I morsetti sono a ritenzione progressiva, quindi auto serranti nella direzione della trazione. Lo spostamento della traversa superiore viene gestito da un software dedicato allo strumento che ne rileva, mediante la cella di carico, la forza necessaria impressa al campione.

Per avere la restituzione delle grandezze di interesse è necessario fornire le misure del provino e la distanza libera tra le pinze.

Non appena viene avviata la prova, gli estensimetri, che costantemente misurano l'allungamento del provino durante la prova, si chiudono automaticamente e comincia la corsa verso l'alto della traversa superiore. Contemporaneamente sul monitor appare il diagramma tensione-allungamento percentuale. La prova ha termine quando il campione giunge a rottura oppure quando si ha una riduzione percentuale prefissata di forza resistente esercitata dal provino.

La prova si ritiene soddisfacente se il provino non scorre all'interno dei morsetti e se la rottura avviene nel tratto di lunghezza utile libero.

Poiché il comportamento dei materiali testati non è perfettamente elastico, durante la fase elastica il diagramma tensioni-deformazioni non è lineare per cui si è adottato il criterio di determinare il modulo elastico come regressione lineare su tutto il tratto elastico, come mostrato nella seguente figura. In particolare, gli intervalli adottati sono diversi a seconda del tipo di rinforzo, quindi, del comportamento globale del materiale in cui sono utilizzati.

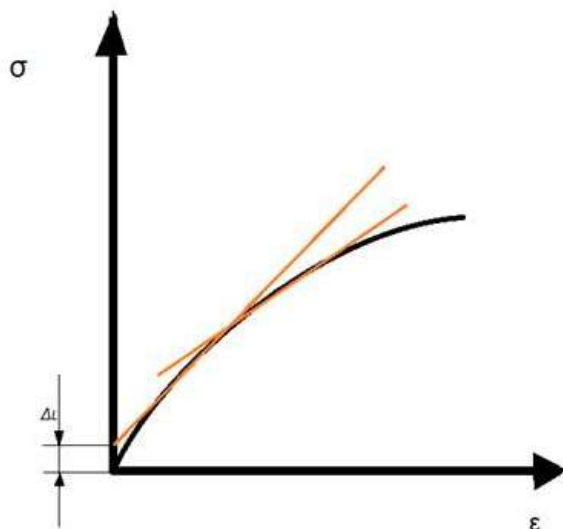



***Fig. 4.47*** *Esempio di rette di approssimazione per regressione lineare*

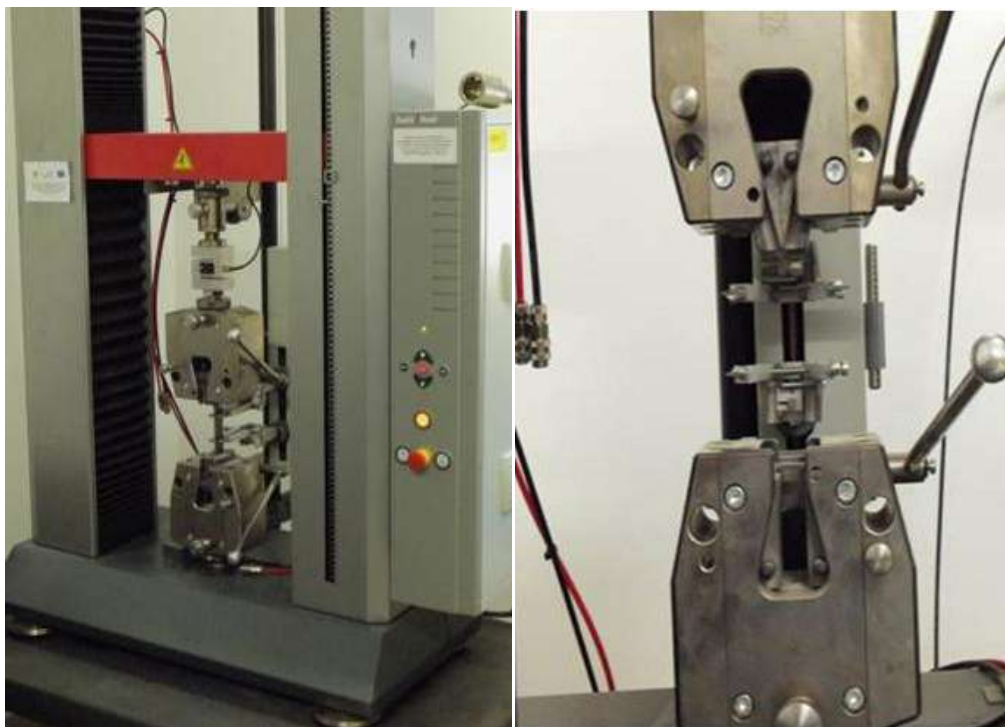



***Fig. 4.48*** *Macchina di trazione in dotazione all'ICTP-CNR di Catania*

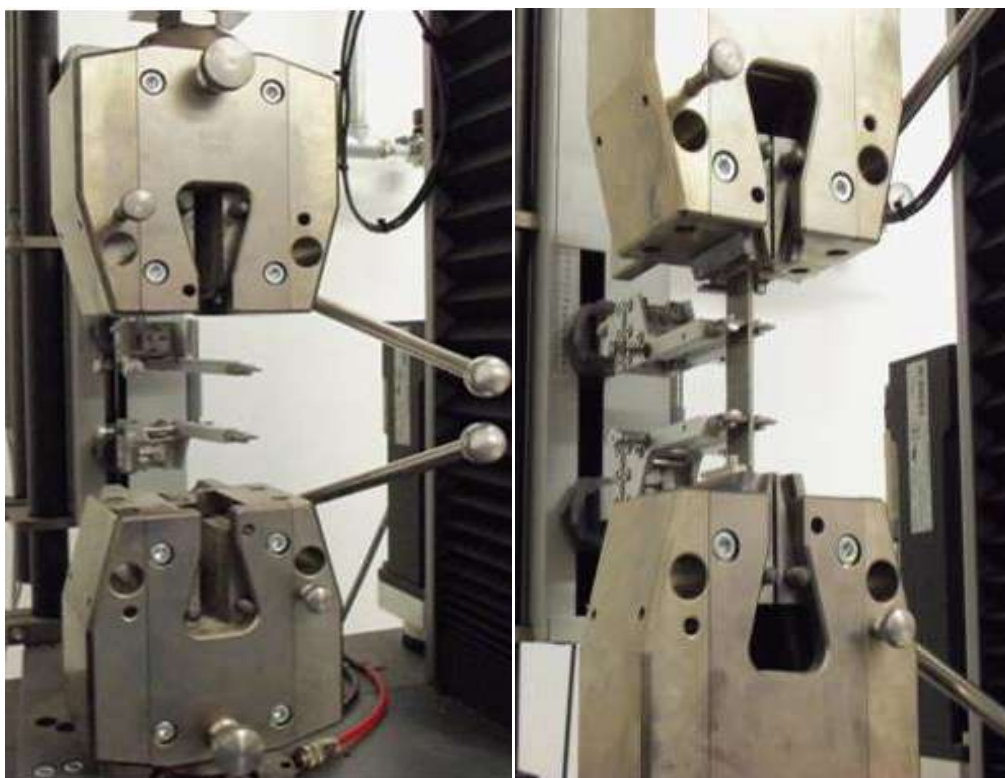



***Fig. 4.49****Macchina di trazione in dotazione all'ICTP-CNR di Catania*

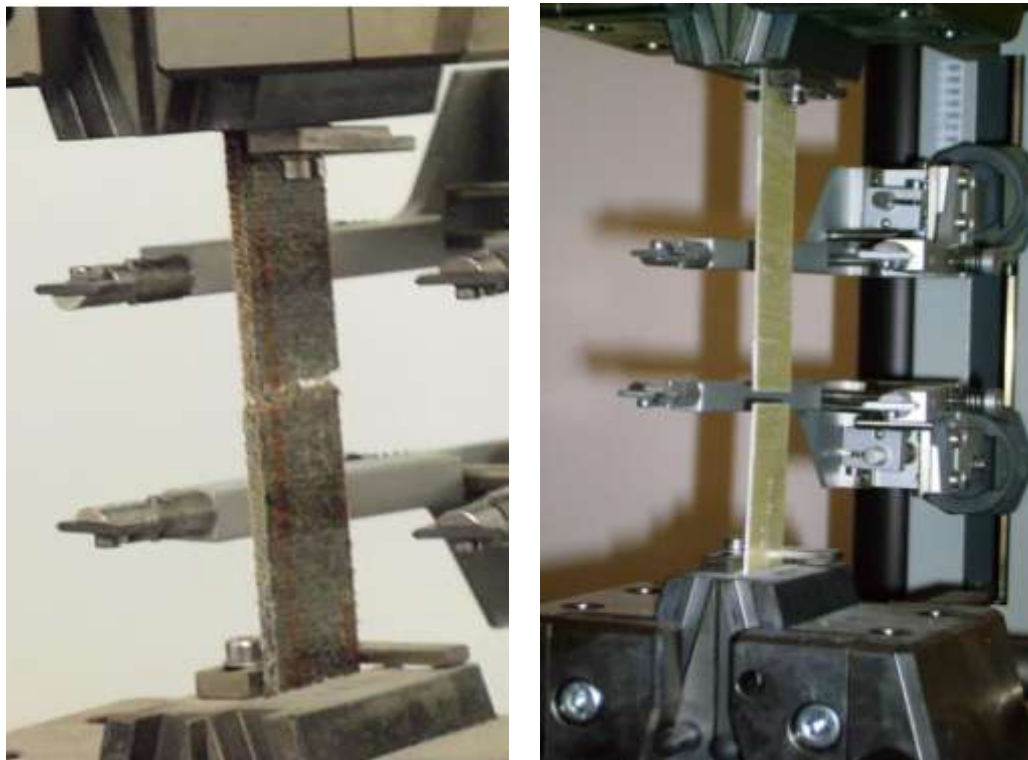



***Fig. 4.50*** *Fase di rottura dei provini*

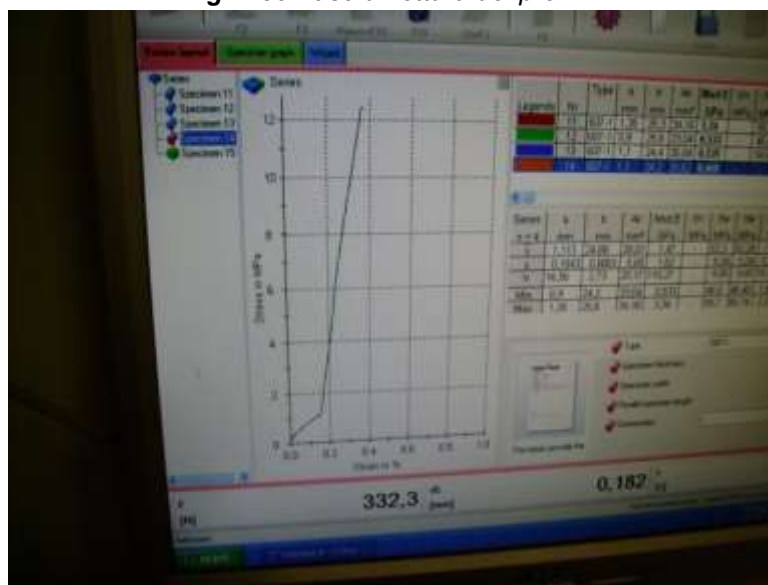



***Fig. 4.51*** *Acquisizione su monitor dei dati della prova di trazione*

## 4.4.4.3 VALUTAZIONE DELLE PROPRIETÁ MECCANICHE VISCO-ELASTICHE A FLESSIONE

Per la caratterizzazione a flessione e per lo studio del comportamento visco-elastico dei compositi sono state effettuate delle prove dinamo-meccaniche (DMA) utilizzando una macchina DMA tipo Tryton tecnolgy modello D6001 in dotazione dei laboratori di chimica del D.I.I.M.

I provini sono stati sollecitati a flessione su tre punti, imponendo una deformazione periodica sinusoidale di 0,01 mm di ampiezza, a frequenza variabile (1 e 10 Hz alternativamente) per osservare l'influenza dei rinforzi, quindi, il comportamento dei compositi sottoposti a sollecitazioni dinamiche, in relazione alla velocità di deformazione (comportamento viscoso). E' importante ricordare che con tale strumento non si porta a rottura il provino, ma lo si sollecita entro il campo di deformazione elastica. La prova ha termine quando si raggiunge la temperatura limite imposta.

La prova è avvenuta in condizioni di temperatura variabile, all'interno dell'intervallo 25-120°C, con incrementi di 2°C/min, per determinare, inoltre, la temperatura di trasizione vetrosa $T_g$, indispensabile parametro per stabilire di fatto la massima temperatura di esercizio di un materiale composito polimerico.

I provini di forma parallelepipeda sono stati ricavati dai laminati prodotti con i due processi produttivi . Le dimensioni dei campioni testati sono quelle indicate in figura (come indicato dalla norma ASTM D4065 – 01). Lo spessore massimo dei provini non deve superare i 7 mm, per cui solo per i laminati realizzati a pressione atmosferica, che hanno uno spessore superiore al limite, è stato necessario limare a mano l'eccesso.

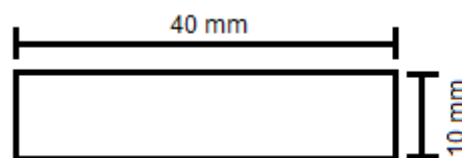



***Fig. 4.52*** *Dimensione della provetta di composito sottoposta alla prova DMA*

L'analizzatore dinamo-meccanico DMA è costituito dai seguenti componenti: un portacampione, a seconda del tipo di prova che si intende eseguire; un attuatore che serve a trasferire la sollecitazione al provino; un

forno;  un sistema di trasduttori per registrare i dati della prova quali sforzi, temperature, spostamenti.

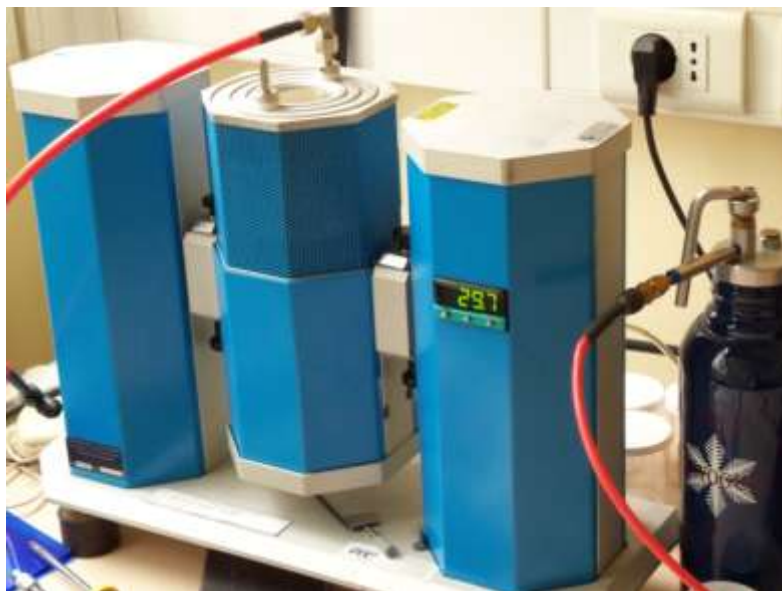



***Fig. 4.53*** *Strumento DMA utilizzato, in dotazione del D.I.I.M.*

***Fig. 4.54*** *Particolare del portacampione per la prova DMA a flessione su tre punti*

***Fig. 4.55*** *Alcuni provini di composito con tessuto Biotex pronti per la prova DMA*

### 4.4.4.4 LA PREVISIONE DELLE PROPRIETÁ MECCANICHE DEI LAMINATI: I MODELLI ADOTTATI

A stretto rigore, poiché i compositi prodotti sono stati realizzati sovrapponendo due o più tessuti (eccezion fatta per il laminato rinforzato con un solo layer di tessuto Mat), l'analisi previsionale andrebbe condotta in due step, utilizzando prima i modelli della micromeccanica per stimare le proprietà meccaniche delle singole lamine rinforzare con un solo layer di tessuto, prodotte in modo da avere la stessa percentuale in volume di fibre della n-esima lamina del composito prodotto, poi i modelli della macromeccanica a partire dai dati micromeccanici.

L'utilizzo dei modelli della macromeccanica presuppone, inoltre, la conoscenza del comportamento interlaminare, ossia dei meccanismi di collasso per delaminazione.

Generalmente però la macromecacnica interviene quando si ha un laminato costituito da più lamine di natura diversa, per matrice e/o rinforzo. Nel caso in esame, avendo a che fare con laminati prodotti utilizzando un'unica resina e layer dello stesso tessuto, si operare come se si avesse un unico layer di tessuto e quindi utilizzare direttamente i modelli

micromeccanici. L'ipotesi adottata è comunque verosimile, in quanto, i layer, sebbene sovrapposti, quindi, soggetti ad una potenziale delaminazione, riescono ad avere un intimo legame fisico di interloking a seguito dalle pressioni di compattazione esercitate. In questo modo non solo si è svolto la stima in un solo step, ma si è anche ottimizzato la campagna sperimentale di produzione dei compositi e di determinazione delle loro proprietà meccaniche, eliminando il problema della caratterizzazione delle singole lamine di ciascun laminato prodotto alle diverse percentuali in volume di rinforzo. In altri termini, la determinazione macromeccanica avrebbe comportato la caratterizzazione meccanica del laminato e della singola lamina di cui è costituito, raddoppiando, quindi, il numero di indagini sperimentali.

La previsione delle proprietà meccaniche dei compositi prodotti è stata effettuata utilizzando i modelli previsionali, per singole lamine, di Cox-Krenchel e di Madsen, ampiamente trattati nel capitolo 3 a cui si rimanda per tutte le equazioni per il calcolo del modulo elastico e della resistenza a trazione.

#### 4.4.4.5 DETERMINAZIONE DELLA CONDUCIBILITÁ TERMICA

I laminati realizzati sono stati caratterizzati dal punto di vista termico, in termini di conducibilità termica. Questo parametro fisico, in unione alle proprietà meccaniche determinate, costituiscono la base attraverso cui è possibile dimensionare i manufatti strutturali e semi-strutturali a cui è richiesto un limite prestazionale in termini di isolamento termico e, quindi, di conservazione delle condizioni termiche (es.pannelli impiegati nelle case prefabbricate; pannelli che costituiscono l'involucro degli aeromobili, etc.)

La determinazione della conducibilità termica è stata effettuata utilizzando il termoflussimetro in dotazione all'Istituto PUK della Technische Universitat di Clausthal (Germania). Il modello in dotazione è il "TCA 200" prodotto dall'azienda tedesca Erich NETZSCH GmbH & Co. Holding KG.

I parametri di operatività dello strumento sono:

- Campo di temperatura: da - 40 °C a 180 ° C.
- Campi di misura della resistenza termica: 0,001-0,05 m2K / W

• Campo di misura della conducibilità termica: da 0,1 a 10 W / mK
• Ambiente: aria o atmosfera di azoto

***Fig. 4.56*** *Termoflussimetro TCA200 in dotazione all'Istituto PUK dell'Università di Clausthal*

In particolare, tutte le prove sono state eseguite su campioni di forma circolare di diametro pari a 50 mm e di spessore massimo di circa 5 mm, concordemente ai limiti strumentali. Tali campioni sono stati ricavati tagliando i laminati prodotti con una sega circolare diamantata. Particolare attenzione è stata posta nel ricavare provette esenti da inclusioni d'aria che avrebbero potuto inficiare i risultati sperimentali.

La prova ha permesso di ricavare la conducibilità termica del provino a diverse temperature 20°C, 30°C, 40°C, 50°C e 60°C), essendo questo l'intervallo maggiormente significativo per le applicazioni civili.

Il tempo necessario per effettuare ciascuna prova è stato circa 24 ore per garantire la quasi-stazionarietà del flusso e quindi valutare le proprietà a regime.

### 4.4.5 METODI: PROGETTAZIONE DEI PANNELLI SANDWICH CON I LAMINATI IN COMPOSITO

#### 4.4.5.1 INTRODUZIONE

Le costruzioni temporanee sono "prodotti" architettonici (case unifamiliari, microarchitetture, installazioni) fatti per durare in un intervallo di tempo o per modificarsi nel tempo.

L'aggettivo temporaneo si contrappone alla condizione di permanenza che ha da sempre caratterizzato l'oggetto o il manufatto edilizio, fatto per "durare nel tempo".

Le costruzioni temporanee si possono definire tali quando per caratteristiche strutturali (quali tecnologie leggere e assemblaggio a secco) occupano il suolo solo temporaneamente, ma anche quando pur essendo stabili risultano adattabili ad usi ed utenze distinte, grazie a strutture flessibili che "attrezzano" lo spazio e lo rendono variabile alle diverse esigenze.

La leggerezza è la caratteristica delle tecniche da cui una costruzione temporanea non può prescindere. Materiali e sistemi costruttivi devono essere leggeri, prima di poter diventare espressione di temporaneità, pertanto la costruzione temporanea si avvale di materiali che siano ridotti nelle dimensioni e nel peso e ricondotti ad elementi da comporre e assemblare a secco, scelti a catalogo nell'ambito della produzione industriale.

La reversibilità è il più alto livello di temporaneità che richiede, nell'atto del costruire, l'impiego di tecnologie leggere e tecniche esecutive industriali, come l'assemblaggio a secco. La reversibilità è quindi la capacità di un processo costruttivo di tornare al punto di partenza "senza lasciare tracce", ad esempio nelle fasi di progettazione, realizzazione e gestione di un green building. Si possono definire reversibili le costruzioni che:

- sono assemblate a secco;
- possiedono un attacco a terra poco invasivo;
- sono costruite con materiali e sistemi ecocompatibili o riciclabili;

- è nota la procedura di montaggio e di smontaggio.

La flessibilità nel costruire contemporaneo è la capacità di produrre ambienti in grado di evolversi e di adattarsi ai cambiamenti di vita degli utenti o all'uso che essi ne fanno nel tempo. Si può definire flessibile, una costruzione che:

- presenta una pianta libera con concentrazione di impianti e servizi;
- presenta un'unica copertura che unifica spazi diversi, aperti o chiusi;
- possiede pareti mobili che garantiscono configurazioni diverse dello spazio;
- possiede sistemi di chiusura esterna variabili nella conformazione e funzionalmente;
- possiede una tipologia strutturale che permette un'ampliabilità futura.

Come anticipato ad inizio dell'attuale capitolo, nella terza ed ultima fase del lavoro sperimentale è stato progettato un sistema di tipo *sandwich* utilizzando gli eco-compositi studiati come pannelli esterni (pelli). Tale sistema è stato adeguato allo svolgimento delle funzioni (UNI 8290) di chiusura orizzontale inferiore (solaio a terra) e superiore (copertura) in un modulo temporaneo abitativo prefabbricato.

Non costituisce oggetto del presente studio, invece, la progettazione della struttura portante, potenzialmente in alluminio, materiale resistente, leggero e riciclabile, né degli impianti ad esso connessi.

### 4.4.5.2 MATERIALI

I materiali presi in considerazione nello studio di progettazione dei pannelli sandwich sono:

- laminati in composito per le pelli esterne;
- legno di balsa pressato per l'anima.

Dal punto di vista ambientale, la scelta delle fibre vegetali e del legno di balsa comportano un impatto molto limitato dovuto al fatto che questi due costituenti sono rinnovabili in quantità notevoli con tempi di coltura brevi, se

paragonati alla crescita alberale o arbustiva comune, e facilmente biodegradabili.

Inoltre, la balsa è un legno pregiato dovuto al fatto che ha una densità notevolmente più bassa di molte altre specie vegetali, canapa compresa. Questo fattore, indispensabile nel settore dei pannelli sandwich e, in particolare, delle costruzioni, permette di realizzare dei componenti a bassissimo peso specifico.

Per quanto riguarda le pelli esterne sono stati presi in considerazione i laminati rinforzati con i quattro tipi di tessuto (Mat, B607, B6240C e Biotex) non trattati chimicamente che hanno mostrato le migliori proprietà meccaniche, soprattutto in termini di modulo elastico.

Per quanto concerne il materiale d'anima è stato adottato il legno pressato di balsa, commercializzato dalla compagnia internazionale DIAB Group.

La balsa (Ochroma pyramidale) è un albero della famiglia Bombacaceae, diffuso in America centro-meridionale. Grazie alle caratteristiche climatiche e geofisiche del territorio nel quale cresce è il legno più leggero conosciuto al mondo.

Il legno di Balsa, nonostante il basso peso specifico, ha una resistenza alla compressione di oltre 100 $Kg/cm^2$ ottenibile grazie alla struttura alveolare del legno stesso. Infatti, il legno di balsa ha dei canali linfatici molto grandi che permettono all'albero una velocissima crescita (in 5 anni una pianta è matura per l'abbattimento).

Per lo studio affrontato è stata adottata la balsa *PB standard* che offre il giusto compromesso tra proprietà meccaniche e leggerezza. Di seguito si riporta la scheda tecnica del prodotto.

| Mechanical Properties | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Property | Method | Unit | LD7 Light Weight | PB Standard | HW Heavy Weight |
| Density | ASTM C 271 | kg/m³ | 90 | 155 | 220 |
| | | lb/ft³ | 5.6 | 9.7 | 13.8 |
| Compressive Strength 1) | ASTM C 365 | MPa | 5.4 | 12.7 | 21.9 |
| | | psi | 783 | 1,842 | 3,176 |
| Compressive Modulus 1) | ASTM C 365 | MPa | 1,850 | 4,100 | 6,840 |
| | | ksi | 268 | 594 | 992 |
| Tensile Strength 1) | ASTM C 297 | MPa | 7.0 | 13.5 | 20.6 |
| | | psi | 1,015 | 1,958 | 2,987 |
| Shear Strength 1) | ASTM C 273 | MPa | 1.6 | 3.0 | 4.5 |
| | | psi | 232 | 435 | 653 |
| Shear Modulus 1) | ASTM C 273 | MPa | 96 | 166 | 237 |
| | | ksi | 14 | 24 | 34 |
| Thermal Conductivity 2) | ASTM C 377 | W/m K | 0.052 | 0.064 | 0.086 |
| | | Btu·in/(ft²·h·°F) | 0.35 | 0.44 | 0.60 |
| R–value | Based on +10° K factor | 12 mm / 0.5 in | 1.4 | 1.1 | 0.8 |
| | | 25 mm / 1.0 in | 2.9 | 2.3 | 1.7 |
| | | 51 mm / 2.0 in | 5.7 | 4.5 | 3.3 |

1) All values measured at +22°C (+72°F).

2) Thermal conductivity at +10°C (+50°F).

***Fig. 4.57*** *Scheda tecnica della balsa considerata*

Le caratteristiche prestazionali termiche della balsa considerata sono state tratte dalla scheda tecnica del prodotto.

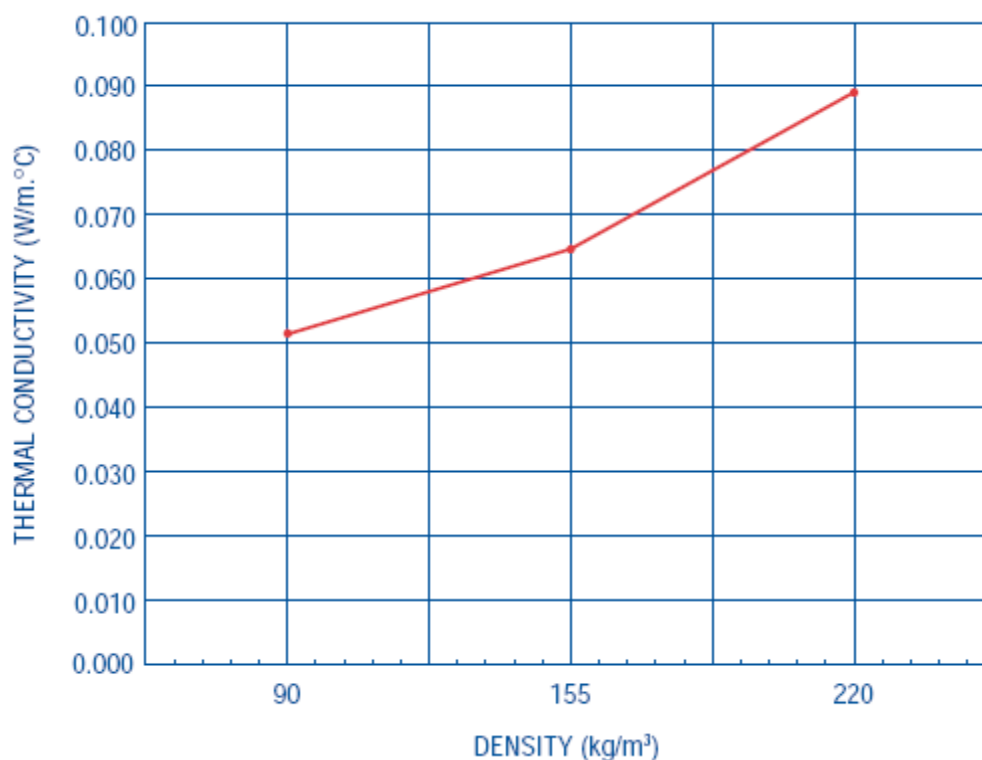



***Fig. 4.58*** *Conducibilità termica della balsa a 23°C (ASTM C177-ASTM C271) in funzione della densità*

***Fig. 4.59*** *Lamine di balsa PB Standard incollate*

## 4.4.5.3 PROGETTO E VERIFICA STRUTTURALE DEI PANNELLI

Si è ipotizzato di voler progettare dei pannelli sandwich che serviranno per realizzare gli elementi di chiusura orizzontale inferiore (calpestio) e superiore (copertura) di un'unità immobiliare modulare temporanea prefabbricata, di pianta quadrata e di superficie calpestabile pari a circa 57 mq.

Di seguito si riporta la configurazione strutturale analizzata per la casa modulare di cui si vogliono progettare gli elementi di chiusura. Nell'elaborato si evidenzia la struttura portante e le chiusure orizzontali inferiore (marrone) e superiore (arancione).

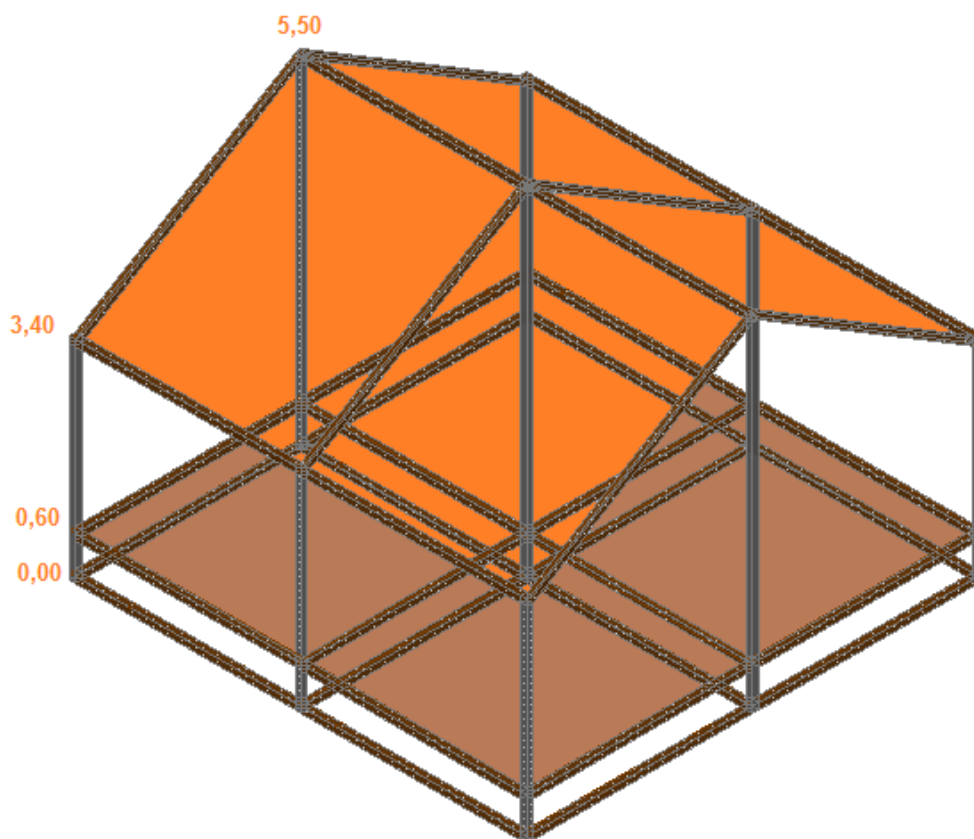



***Fig. 4.60*** *Casa modulare prefabbrica presa come caso studio ed elementi di chiusura orizzontale inferiore (marrone) e superiore (arancione)*

Il modulo abitativo è stato suddiviso in quattro blocchi quadrati assemblati, di lato pari a 3,8 m, in modo tale da rendere la forma e le dimensioni della casa sufficientemente flessibili. Di conseguenza i pannelli che costituiscono il sistema di chiusura orizzontale hanno le dimensioni del modulo base, mentre, poiché la pendenza delle falde di copertura è circa 30°, i pannelli che costituiscono il sistema di chiusura superiore sono di dimensioni maggiore rispetto ai primi, come riportato nelle figure a seguire.

Poiché per procedere nella fase progettuale è necessario fissare un sistema di carichi agenti sugli elementi, si è fatto riferimento ai carichi indicati dalla Normativa Tecnica sulle Costruzioni del 14 gennaio 2008. Nella fattispecie, non avendo i pannelli una funzione strutturale, si è ipotizzato che la struttura portante non trasmetta ad essi alcun carico e che gli unici carichi agenti siano solo quelli statici, permanenti e variabili, in particolare:

-carichi permanenti strutturali

-carichi permanenti non strutturali

-sovraccarichi variabili

-carico da neve (considerando una località montana a 1000 m sul livello del mare situata in Sicilia)

- carico da vento (considerando una località montana a 1000 m sul livello del mare situata in Sicilia).

Inoltre, per massimizzare le sollecitazioni agenti sui pannelli di chiusura orizzontale si è adottato lo schema di pannello semplicemente appoggiato su tutti e quattro i lati, con carico uniformemente distribuito su tutta la superficie.

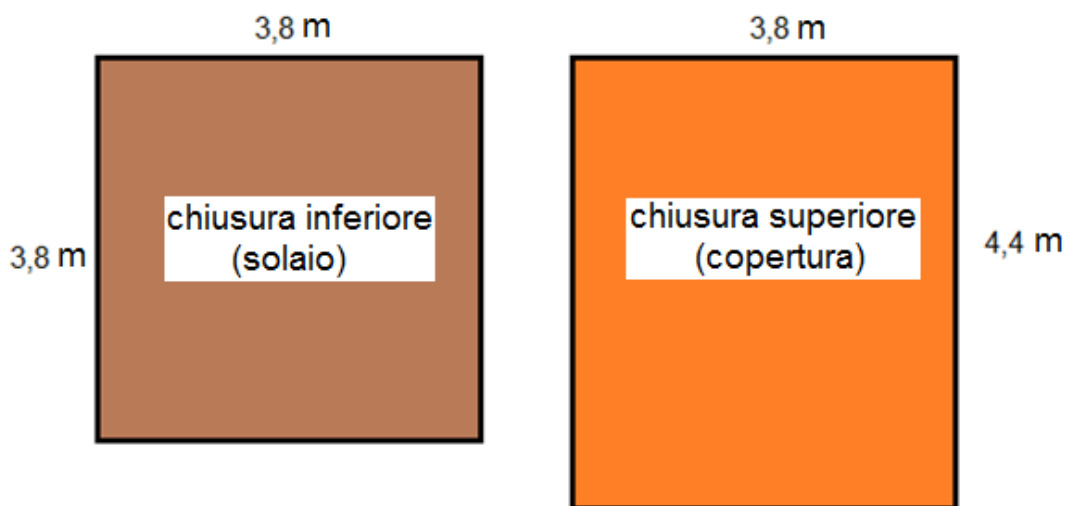



***Fig. 4.61*** *Dimensione dei pannelli di chiusura orizzontale inferiore (marrone) e superiore (arancione)*

Nel corso della progettazione è stata garantita la sicurezza nei confronti degli stati limite previsti dalla Norma. Secondo quanto stabilito nei capitoli specifici, le opere e le varie tipologie strutturali devono possedere i seguenti requisiti:

- *sicurezza nei confronti di stati limite ultimi (SLU)*: capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere l'incolumità delle persone ovvero comportare la perdita di beni, ovvero provocare gravi danni ambientali e sociali, ovvero mettere fuori servizio l'opera;
- *sicurezza nei confronti di stati limite di esercizio (SLE):* capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio;

- *robustezza nei confronti di azioni eccezionali:* capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità delle cause innescanti quali incendio, esplosioni, urti.

Il superamento di uno stato limite ultimo ha carattere irreversibile e si definisce collasso.

Il superamento di uno stato limite di esercizio può avere carattere reversibile o irreversibile.

Come si evince dalla figura precedente, le dimensioni dei pannelli di copertura sono superiori rispetto a quelli di chiusura orizzontale inferiore, in quanto, la falda di copertura è inclinata di 30° rispetto all'orizzontale. Questo comporta che, nel calcolo dlle sollecitazioni, i carichi verticali agenti hanno due componenti, una ortogonale al piano del pannello, l'altra in direzione parallela. La componente parallela comporta, quindi, uno sforzo assiale di compressione.

Oltre ad una sufficiente resistenza meccanica agli sfrozi, i pannelli di chiusura orizzontale devono possedere l'ulteriore requisito secondo cui l'abbassamento massimo al centro del pannello non deve superare un valore limite riportato nella seguente tabella, estratta dal DM 14 gennaio 2008.

***Tab. 4.1*** *Estratto dalla tabella 4.2.X del DM 14 gennaio 2008 – Limiti di deformabilità per gli elementi di impalcato delle costruzioni ordinarie*

| Elementi strutturali | Limiti superiori per gli spostamenti verticali | |
|---|---|---|
| | $\frac{\delta_{max}}{L}$ | $\frac{\delta_2}{L}$ |
| Coperture in generale | $\frac{1}{200}$ | $\frac{1}{250}$ |
| Coperture praticabili | $\frac{1}{250}$ | $\frac{1}{300}$ |
| Solai in generale | $\frac{1}{250}$ | $\frac{1}{300}$ |
| Solai o coperture che reggono intonaco o altro materiale di finitura fragile o tramezzi non flessibili | $\frac{1}{250}$ | $\frac{1}{350}$ |
| Solai che supportano colonne | $\frac{1}{400}$ | $\frac{1}{500}$ |
| Nei casi in cui lo spostamento può compromettere l'aspetto dell'edificio | $\frac{1}{250}$ | |
| *In caso di specifiche esigenze tecniche e/o funzionali tali limiti devono essere opportunamente ridotti.* | | |

Nella tabella sono evidenziati i limiti di deformabilità che sono stati rispettati in fase di progettazione.

Utilizzando lo schema di piastra in appoggio su tutti e quattro i lati, le caratteristiche di sollecitazione, quindi le tensioni, agenti sui pannelli sono state calcolate facendo ricorso alle formulazioni esposte nel paragrafo 3.4 e contenute nel manuale tecnico della DIAB Group, sviluppate sulla scorta delle teorie classiche delle piastre, delle indagini sperimentali condotte in proprio e alle esperienze di progettazione maturate nel corso degli anni di attività nel settore.

In figura 4.62 si indicano con *c* e *t* gli spessori rispettivamente del core e delle pelli. Di seguito si riportano le formulazioni utilizzate, con il riferimento alla numerazione progressiva adottata nel 4.3, per il progetto dei pannelli del solaio di calpestio e di copertura.

***Fig. 4.62*** *Schema del pannello sandwich progettato e relative dimensioni*

Nel caso in esame, poiché il pannello può essere considerato come una trave larga, in tutte le formulazione in cui si considera il modulo elastico si deve considerare  il rapporto $E/(1-v^2)$.

Per la balsa è stato considerato un valore del coefficiente di Poisson pari a $v$=0,230, mentre per i compositi un valore calcolabile con le regole delle miscele, considerando per la resina un valore pari a 0,330 e per le fibre un valore di 0,260.

Operando in sicurezza, non avendo comunque dati sperimentali a riguardo, si considera che le caratteristiche di modulo e resistenza a compressione di ciascun composito siano quelle della sola resina, trascurando, quindi, l'influenza del rinforzo. Il comportamento a compressione della resina è stato considerato, a vantaggio della sicurezza, uguale a quello di trazione di cui si conoscono i parametri meccanici.

Tale scelta porta a considerare il pannello sandwich come se avesse facce diverse, non per lo spessore, ma per la natura dei materiali.

Inoltre, si ipotizza che nel core di balsa si ha $\sigma_x \approx \sigma_y \approx \tau_{xy} \approx 0$ che comporta il calcolo della tensione tangenziale nei piani verticali utilizzando il modulo di taglio modificato con l'espressione (117):

$$G' = \frac{G_c}{1 + \frac{E_c}{6E_f} \cdot \frac{c^2}{t(c+t)}}$$

La rigidezza flessionale D, considerando una larghezza b=1 m del pannello, è stata calcolata con l'espressione (80) sviluppata in modo da tenere in conto della diversità di modulo a compressione e a trazione delle pelli esterne, seppure di uguale materiale e spessore:

$$D = \left(E_f + \mathrm{E_m}\right)\frac{bt^3}{12} + \left(E_f + \mathrm{E_m}\right)\frac{btd^2}{4} + E_c\frac{bc^3}{12}$$

Utilizzando il modulo di taglio corretto e la rigidezza flessionale è possibile calcolare le tensioni massime agenti nel pannello, utilizzando le espressioni da (126) a (130), dopo aver determinato i valori di $\beta_3$, $\beta_4$, $\beta_5$, $\beta_6$ e $\beta_7$ dai diagrammi relativi in funzione del rapporto a/b che sono le dimensioni in pianta del pannello:

- tensione normale massima nelle pelli esterne (al centro del pannello)

$$\sigma_x = \frac{qb^2}{td}\left(\beta_3 + \nu_f \beta_4\right)$$

$$\sigma_y = \frac{qb^2}{td}\left(\beta_4 + \nu_f \beta_3\right)$$

- tensione tangenziale massima nelle pellie sterne (agli angoli del pannello)

$$\tau_{xy} = \frac{qb^2}{td}\left(1 - \nu_f\right)\beta_5$$

- tensione tangenziale massima nel core (a metà dei lati lungo il perimetro del pannello)

$$\tau_{xz} = \frac{qb}{d}\beta_6$$

$$\tau_{yz} = \frac{qb}{d}\beta_7$$

I valori calcolati sono stati confrontati con i corrispondenti valori di resistenza.

L'abbassamento massimo che si verifica al centro del pannello è stato calcolato con l'espressione (125):

$$w_{max} = \frac{q\mathrm{b}^4}{D_2}\sum\sum[\beta_1 + \rho\beta_2]$$

Nel caso dei pannelli di copertura, considerando che i carichi verticali hanno una componente assiale, è necessario verificare che non si raggiunga il carico critico sul bordo per unità di lunghezza, calcolato per mezzo dell'espressione (136):

$$P_{xmn} = \frac{\pi^2 D}{b^2}K_1$$

in cui D è la rigidezza flessionale del pannello, già calcolata

$K_1$ è il coefficiente d'ingobbamento, in funzione del rapporto tra la larghezza e la lunghezza a/b e del valore di ρ che è una costante che rappresenta il rapporto tra la rigidezza flessionale $Etd^2/2g$, e la forza di taglio Gd cioè (espressione 138):

$$\rho = \frac{\pi^2}{2g}\frac{E}{G}\frac{td}{b^2}$$

Il valore di $K_1$ è stato determinato grazie ai diagrammi sviluppati nel manuale DIAB, riportati nel capitolo 3.

Nel caso in cui, il carico distribuito agisce in concomitanza con il carico assiale, si può dimostrare che le relazioni valide per il solo carico distribuito sono valide a condizione che ogni termine delle serie per il calcolo delle funzioni β venga moltiplicato per un fattore (1-P/Pxmn)-1 . E' questo il caso dei pannelli di copertura, per cui è necessario tenerne conto.

Infine, per la copertura è stata verificata la resistenza assiale, attraverso il modulo equivalente del pannello:

$$E_{eq} = \frac{E_b c + E_p t}{ct}$$

Conoscendo la componente assiale del carico F e l'area trasversale del pannello  si può calcolare la deformazione di compressione (uguale nelle facce e nel core per il principio di uguaglianza delle deformazioni in un corpo soggetto a una sollecitazione assiale):

$$\varepsilon = F/SE_{eq}$$

dalla deformazione, moltiplicando per il modulo elastico di ciascun componente si determina la tensione agente che sarà confrontata con la resistenza delle pelli e del core material (balsa).

Una ipotesi importante che sta alla base del calcolo è la totale solidarietà degli strati che compongono il sandwich. Infatti, se avvenisse la delaminazione delle pelli dal core il comportamento reale sarebbe differente da quello ipotizzato. Tale scelta equivale all'adozione di un collante che possiede una resistenza al taglio sufficientemente elevata e tale da sopportare la differenza di sforzo tra gli strati del pannello che dipende dalle sollecitazioni e dalla rigidezza dei componenti.

Inoltre, si considera che il pannello giunga al collasso solo quando una delle tensioni agenti sui componenti supera la resistenza del materiale.

Il progetto è stato suddiviso in due parti, la prima relativa alla copertura, la seconda ai pannelli del solaio di calpestio.

La fase progettuale è stata affrontata nel rispetto dei requisiti strutturali di sufficiente resistenza meccanica e limitato abbassamento al centro del pannello, ma tenendo conto anche dei seguenti aspetti progettuali:

- riduzione al limite inferiore dello spessore dei pannelli;
- riduzione al limite inferiore del peso dei pannelli;

- rispetto dei limiti di trasmittanza termica fissati dalla normativa in materia.
- Verifica dei requisiti termoigrometrici fissati dalla normativa in materia.

Ovviamente i quattro aspetti appena menzionati non possono essere affrontati separatamente, piuttosto si tratta di considerarli contemporaneamente in un'ampia fase di scelta multicriteriale, sempre nel rispetto dei requisiti strutturali.

La procedura di progetto adottata è sintetizzata nel seguente diagramma a blocchi.

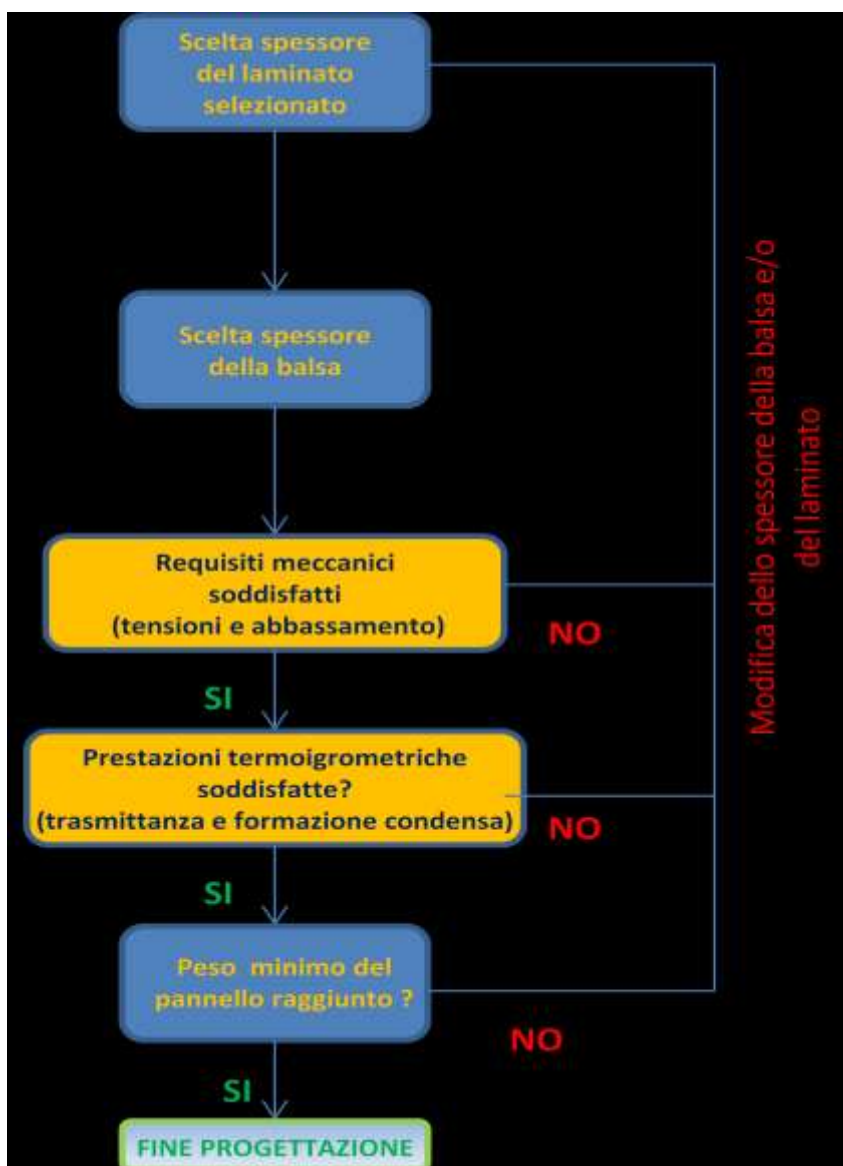



***Fig. 4.63*** *Schema di flusso del progetto di un pannello sandwich*

Il punto di partenza è costituito dall'adozione di uno spessore del pannello in composito limitato perché da questo dipende in misura maggiore il peso del sandwich, aumentandolo solo se sono richieste ulteriori prestazioni meccaniche.

I laminati presi in considerazione sono quelli rinforzati con tessuti non trattati e che hanno mostrato le migliori proprietà meccaniche.

E' ovvio che la progettazione eseguita può essere modificata a piacimento e in funzione delle esigenze, adottanto una qualunque laminato con percentuale in volume di rinforzo differente da quelle ottenute nel presente lavoro di tesi. In tale evenienza, le caratteristiche fisiche e meccaniche possono essere ricavare sperimentalmente impiegando il modello previsionale di Madsen con le proprietà meccaniche ottenute per le fibre/filati mediante "back calculation" (vedasi paragrafo sviluppato in seguito).

Di conseguenza, dal punto di vista produttivo, variata la percentuale in volume di rinforzo e dei vuoti nel composito, si dovrà operare per modificare le condizioni di processo per ottenere un laminato completamente impregnato, con elevata finitura, operando un controllo sulla quantità di tessuto nel composito, sullo spessore del laminato e, quindi, sulle pressioni di compattazione.

Scelto lo spessore del laminato, si determina mediante un calcolo iterativo lo spessore minimo di balsa tale da garantire il soddisfacimento dei requisiti meccanici. Questa fase richiede la preventiva analisi dei carichi.

Soddisfatti i requisiti meccanici, si passa alle prestazioni termiche di sandwich che deve possere una trasmittanza termica inferiore al limite fissato da normativa (vedasi paragrafo seguente) e garantire la completa evaporazione della condensa interstiziale che si è accumulata durante l'anno, causa il degrado delle proprietà di isolamento termico dei pannelli.

Raggiunta una prima soddisfacente configurazione del sistema sandwich, si verifica se esiste una configurazione migliore in termini di densità, quindi, peso del pannello, compatibilmente con il raggiungimento delle prestazioni termiche minime, agendo sullo spessore del laminato utilizzato, con evidenti benefici sulle azioni di progetto da considerare, sul trasporto e manegevolezza del componente stesso.

#### 4.4.5.4 ANALISI DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DEI PANNELLI SANDWICH PROGETTATI

Soddisfatti i requisiti meccanici, si passa alla verifica dei requisiti prestazionali termoigrometrici dei sandwich.

La prestazioni termiche saranno valutate in relazione a:

- non superamento del limite superiore di trasmittanza termica U, per la località prescelta, fissato da normativa
- la quantità massima di condensa interstiziale accumulata durante l'anno non deve superare un valore limite e deve evaporare completamente durante l'estate perché potrebbe causare il degrado delle proprietà di isolamento termico dei pannelli (acqua distillata possiede una trasmittanza di 0,6 W/mK a temperatura ambiente). Inoltre, deve essere garantita la non formazione di condensa superficiale nelle pareti a contatto con gli ambienti interni.

Il calcolo della trasmittanza termica globale degli elementi di chiusura, essendo una struttura sandwich composta, è stato eseguito in accordo con la norma UNI EN ISO 6946:2008 (norma da seguire per la valutazione delle trasmittanze ai sensi del D.Lgs. 311/06).

La trasmittanza U si definisce come il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari ad 1°C ed è legata alle caratteristiche del materiale che costituisce la struttura e alle condizioni di scambio termico liminare e si assume pari all'inverso della sommatoria delle resistenze termiche degli strati:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad [W/m^2K]$$

con $R_T = R_{si} + R_1 + .. + R_n + R_{se}$ resistenza termica globale

$R_{si}$ resistenza superficiale (adduttanza) interna

$R_{1..n}$ resistenza termiche di ciascuno strato

$R_{se}$ resistenza superficiale (adduttanza) esterna

con $R = d/\lambda$ in cui *d* è lo spessore e $\lambda$ è la conducibilità termica

Il calcolo della trasmittanza termica costituisce la base di applicabilità della norma UNI EN ISO 13788:2008 che indica la procedura di calcolo e verifica termoigrometrica. Tale norma, entrata in vigore ormai da qualche anno in sostituzione della UNI 10350, prevede un calcolo di tipo mensile, molto più aderente alla realtà rispetto ai metodi utilizzati fino a qualche anno fa.

Il calcolo della dispersione del calore degli elementi d'involucro edilizio viene condotto, normalmente, considerando un regime termico stazionario. Si ipotizza, cioè, che la differenza tra le temperature, all'esterno e all'interno dell'edificio, sia costante nel tempo. L'ipotesi è accettabile se si sta affrontando un'analisi per il calcolo delle prestazioni nella stagione invernale. Ad esempio, si attribuisce alla sola caratteristica della resistenza termica il controllo del passaggio del calore trascurando la capacità termica dell'involucro esterno dovuta alla diversa disposizione dei materiali o al rapporto massa/conducibilità.

In realtà durante l'arco della giornata la temperatura esterna e quella interna variano secondo determinate leggi che normalmente si possono approssimare a sinusoidi.

Per valutazioni durante la stagione estiva questa variazione assume una portata molto più significativa e pertanto, per un'analisi corretta, sono necessarie valutazioni dinamiche.

Nella valutazione in regime dinamico entrano in gioco diversi parametri che nel regime termico stazionario sono completamente trascurati. Pertanto, per descrivere il comportamento in regime termico dinamico di un elemento d'involucro, la trasmittanza termica periodica, risulta il parametro più corretto e rappresentativo.

La trasmittanza termica periorica $Y_{IE}$ [W/m$^2$k], è una grandezza introdotta nell'art. 2 del D.P.R. 59/2009, come prodotto del fattore di attenuazione *fa* (riferito a una sollecitazione armonica nell'arco di 24 ore) per la trasmittanza termica stazionaria *U*, può essere definita come il parametro che valuta la capacità di un elemento opaco di sfasare ed attenuare il flusso termico che la attraversa nell'arco delle 24 ore; la norma tecnica di riferimento, la UNI EN ISO 13786:2008, descrive come calcolare, sulla base delle caratteristiche termo-fisiche dei materiali (conducibilità termica, spessore, calore specifico e densità) e dalla stratigrafia della struttura, la

trasmittanza termica periodica e gli altri parametri termici dinamici: fattore di attenuazione (*fa*) e coefficiente di sfasamento temporale ($\varphi$).

Il *fattore di attenuazione* è definito come il rapporto fra il flusso termico in condizioni reali (si ottiene dalla soluzione dell’equazione generale della conduzione del calore in regime variabile) e il flusso termico in condizioni di assenza di accumulo di colore, governato dalla legge ($q = U x \Delta T$).

I valori di f sono compresi fra 0 e 1 in cui il valore minimo indica il totale accumulo di calore mentre il valore massimo indica l’assenza di accumulo. Un valore basso del fattore di attenuazione indica un buon componente per la fase estiva, al contrario se il fattore ha un valore elevato.

Lo *sfasamento* è definito come il tempo (ore) che serve all'onda termica per fluire dall'esterno all'interno attraverso una stratigrafia (orizzontale o verticale). Maggiore è lo sfasamento, più lungo sarà il tempo di passaggio del calore all'interno dell'edificio e dunque maggiore “schermatura” nella stagione estiva E’, quindi, in sintesti la differenza di tempo che intercorre tra l'ora in cui si ha la massima temperatura all'esterno e l'ora in cui si ha la massima temperatura all'interno. Valori di sfasamento consigliato per un buon confort termico si aggirano sulle 8-12 ore.

La conducibilità termica dei singoli strati che verrà impiegata nei calcoli è misurata in laboratorio su campioni accuratamente preparati ed essiccati in forno: i valori così ottenuti, validi come riferimento, non si prestano però ad essere impiegati direttamente nei calcoli. I materiali, infatti, in particolare quelli isolanti, assumono in esercizio caratteristiche diverse da quelle di prova. L'assorbimento di umidità provoca un aumento della conducibilità termica: questo assorbimento è dovuto alle caratteristiche costituzionali del materiale (per esempio: igroscopicità), influenzate, a loro volta, dall'ambiente in cui il materiale è installato (ambiente interno, esterno, a contatto del terreno, ecc.). Altri fattori in grado di variare in qualche misura la conducibilità termica in esercizio dei materiali isolanti, rispetto a quella di prova, sono per esempio: l'invecchiamento, il costipamento (per materiali sfusi), le tolleranze di produzione (sullo spessore, sulla densità e sulla omogeneità), la messa in opera, ecc.

Per questa ragione le norme UNI forniscono i valori della conducibilità di calcolo, ottenuti maggiorando opportunamente i valori della conducibilità di prova, per tenere conto dei fattori sopra esposti.

Si noti tuttavia che questi valori tengono conto della sola umidità di equilibrio con l'ambiente, nelle varie condizioni di impiego; non tengono invece conto - ne lo potrebbero in alcun modo - dell'effetto della eventuale condensazione di umidità atmosferica all'interno del materiale in conseguenza di particolari condizioni di esercizio.

Scopo della verifica termoigrometrica è appunto quello di accertare le condizioni igrometriche di esercizio del materiale, in quanto in grado di influenzare le sue caratteristiche termiche e di durata.

Non sempre tuttavia la possibilità di condensazione è condizione assoluta di inaccettabilità del manufatto: infatti, entro certi limiti, è possibile tollerare la presenza, per un periodo dell'anno, di condensa interstiziale.

La norma UNI EN ISO 13788 fornisce la procedura per la verifica della formazione di condensa interstiziale. Per effettuare queste verifiche, che debbono essere effettuate per ogni mese dell'anno come prevede la Norma Europea, è necessario conoscere le temperature e le condizioni igrometriche di progetto interne ed esterne dell'edificio e le caratteristiche di ciascuno strato di materiale componente la parete:

- spessore
- conduttività termica
- resistenza alla diffusione del vapore

Il calcolo consiste nel determinare mese per mese il diagramma di Glaser, cioè, seguendo le indicazioni di tale norma, si calcolano i profili delle temperature e delle pressioni di vapore acqueo (saturo ed effettivo) all'interno della parete: se la pressione di vapore effettiva (Pe) raggiunge o supera quella della pressione di vapore saturo (Ps), si avrà formazione di condensa nella parete.

Secondo la norma, le condizioni interne di umidità dipendono dal tipo di utilizzo dei locali (classe di concentrazione del vapore da bassa ad alta); le condizioni esterne (temperatura ed umidità) dipendono dalla località e tengono conto della variazione nei 12 mesi dell'anno. La verifica si svolge per ciascuno dei 12 mesi, durante i quali si calcola se, quando e quanta condensa si accumula nella parete e se questa è in grado di evaporare nel periodo più favorevole.

La verifica, positiva o negativa, dipende dai criteri di accettabilità previsti dalla norma: la quantità massima accumulata non deve superare un valore limite e deve evaporare completamente durante l'estate.

La norma prevede anche la verifica del pericolo di condensa superficiale per evitare muffe e fenomeni di corrosione.

## 4.5 RISULTATI E DISCUSSIONE

### 4.5.1 CARATTERIZZAZIONE DELLE FIBRE: DENSITÁ E PROPRIETÁ A TRAZIONE

Per ciascun tessuto di rinforzo è stata determinata la densità areale e la densità della fibra o del filato di cui è costituito. Si riportano di seguito i risultati sperimentali che stanno alla base delle successive valutazioni sulle proprietà fisiche e meccaniche dei laminati prodotti.

***Tab. 4.2 D****ensità e densità areale delle fibre e dei filati impiegati*

| Tessuto | $\rho$ [g/cm$^3$] | $\rho_{areale}$ [g/m$^2$] |
|---|---|---|
| **Mat** | 1,306 | 780 |
| **B607** | 1,342 | 243 |
| **B624OC** | 1,282 | 176 |
| **Biotex** | 1,390 | 420 |

Nel seguito, invece, sono riportati i valori ottenuti dalle prove di trazione sulle fibre o sui filati, a seconda della tipologia di tessuto. Nella fattispecie si riporta la tensione massima σ, l'allungamento massimo $\varepsilon$ e il modulo elastico E, estrapolati dalle serie di dati ottenuti, nonché le statistiche associate ad esse.

Il modulo elastico è stato valutato come la pendenza della retta tangente al diagramma in corrispondenza alla deformazione dello 0,05%.

*Tab. 4.3* *Risultati delle prove di trazione sulle fibre e sui filati*

| Tipologia tessuto | Modulo Elastico E (media) | Scarto quadr. medio s | Resistenza a trazione σ max (media) | Scarto quadr. medio s | Allungamento massimo ε max (media) | Scarto quadr. medio s |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | MPa | | MPa | | % | |
| **Mat wet** | **12800** | **8100** | **1113,7** | **296,7** | **4,7** | **1,4** |
| **Mat** | **28000** | **16800** | **1161,8** | **436,4** | **2,5** | **0,8** |
| **B607** | **555** | **160** | **598,3** | **118,1** | **9,1** | **1,1** |
| **B6240C** | **1700** | **606** | **384,0** | **59,5** | **7,0** | **0,8** |

A titolo puramente esplicativo si riportano due dei diagrammi relativi alla prova di trazione sulle fibre del mat e i filati twisted del B6240C. Nell'asse delle ascisse è riportato l'allungamento percentuale, mentre, nell'asse delle ordinate la tensione agente sul provino.

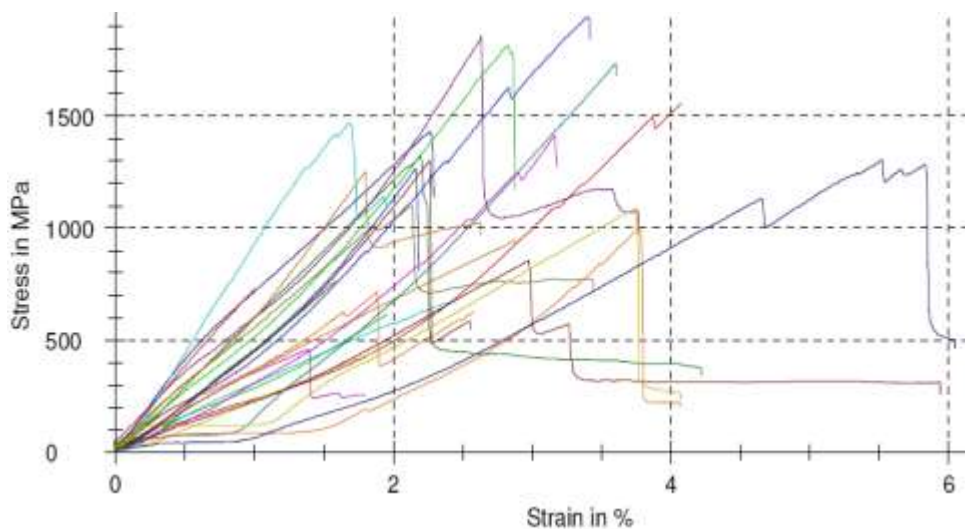



***Fig. 4.64*** *Test di trazione sulle fibre del tessuto non tessuto Mat*

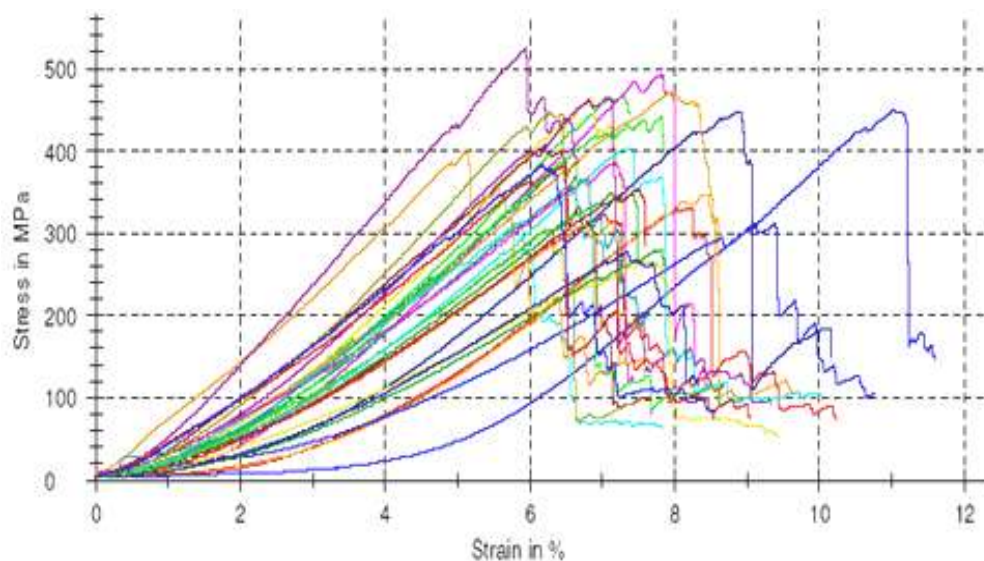



***Fig. 4.65*** *Test di trazione sui filati ritorti del tessuto B6240C*

Osservando con attenzione la tabella, il primo confronto che è interessante analizzare è tra le fibre di canapa estratte dal mat tal quale, ossia in condizioni di umidità naturale ambientale, e le stesse fibre dopo adeguato essiccamento in forno a 70°C fino al raggiungimento del peso costante. Dal confronto del modulo elastico, della resistenza a trazione e dell'allungamento si evince che la procedura di essiccazione rende le fibre più rigide (maggiore modulo elastico e minore deformazione a rottura). Questo effetto è imputabile alla plasticizzazione creata dall'umidità assorbita dalle fibre.

È da notarè che la natura idrofila delle fibre vegetali porta all'assorbimento di quantità di umidità notevoli, fino al 10-15% in massa. Per tale ragione tutti i test a trazione sono stati condotti sui filati opportunamente essiccati in forno ad una temperatura e per una durata sufficiente all'evaporazione dell'acqua assorbita dalle fibre.

E' importante specificare che, nel caso del tessuto non tessuto, denominato Mat, la prova di trazione è effettuata su un bundle di fibre, di cui è costituito lo stesso tessuto, mentre, nel caso dei tessuti B607 e B6240C il test è condotto su yarn di fibre che sono di tipo ritorto (twisted). Da qui, fino alla fine della trattazione il "bundle" naturale di fibre di canapa estratto dal Mat verrà chiamato semplicemente "fibra".

Dalla tabella si evince che le fibre del Biotex non sono state testate a trazione perché, essendo questo tessuto stato adottato nell'ultima fase dello studio sperimentale, si è giunti alla conslusione, come sarà più chiaro

nel prosieguo, che la caratterizzazione dei filati allo stato “secco”, ossia senza resina, non ha alcuna utilità ingegneristica, in quanto sottostima di molto le proprietà meccaniche del rinforzo, come mostra evidentemente la tabella 4.3. Piuttosto, per poter impiegare le proprietà meccaniche dei filati nei modelli previsionali delle proprietà delle lamine è necessario determinare il loro comportamento quando sono immersi in un mezzo che consente il trasferimento di carico tra le fibre corte di cui è costituito il filato (back calculation delle proprietà del filato nel composito).

Come si evince dalle proprietà meccaniche riportate in tabella 4.3, le proprietà dei filati sono nettamente inferiori rispetto a quelle delle singole fibre in bundle estratte dal mat. Ciò è da attribuire al fatto che nel mat il bundle viene tagliato ad una lunghezza di circa 50 mm e compattato nel tessuto tramite pressatura, senza subire ulteriori trattamenti; Il filato, invece, è formato da una serie di fibre di diametro notevolmente inferiore, ottenute dalla disgregazione del bundle, e molto più corte, strettamente intrecciate e avvolte a spirale. Quando questi filati vengono utilizzati come rinforzo per materiali compositi, nel caso di perfetta impregnazione del tessuto, si comportano come se fossero delle fibre lunghe e continue. Questo comportamento verrà meglio evidenziato nel seguito.

E’ altresì importante notare come la scarto quadratico medio associato a ciascun valore medio delle grandezze valutate sia ampio. L’evidenza trova giustificazione nel fatto che le fibre vegetali possono avere, come nel caso in esame, una grande variabilità di composizione chimica e di struttura fisica, legato alle condizioni di crescita, al suolo, al processo estrattivo che anche per lo stesso *stocking* possono essere diverse.

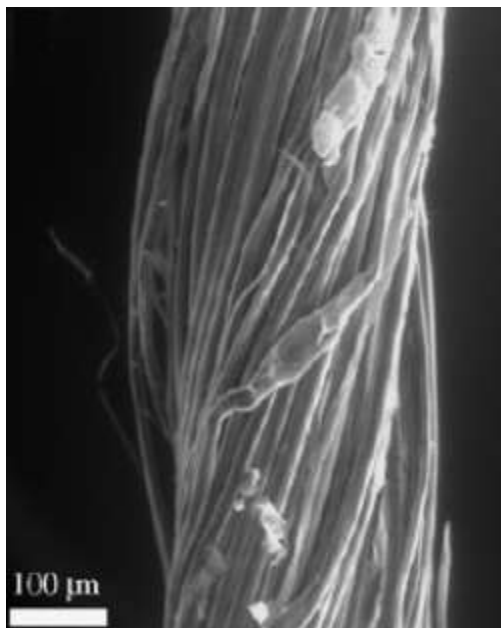



***Fig. 4.66*** *Scansione al SEM di un filato ritorto di B607*

L'evidenza sperimentale trova conferma in diversi studi presenti in letteratura. Come si evince da quello condotto da Goutianos et al., l'effetto risultante di una sollecitazione di trazione su un filato costituito da fibre corte e ritorte a spirale consiste in una prima fase di resistenza all'azione, seguita da uno scorrimento reciproco delle fibre, oltre i valori tipici di una singola fibra soggetta alla medesima sollecitazione.

Inoltre, come dimostra sempre lo stesso studio, la resistenza di un filato, secco o impregnato, è fortemente influenzata dal numero di torsioni applicate. Se il numero di torsioni supera una certa soglia, la differenza tra la resistenza a trazione del filato impregnato e quello secco, diminuisce, in quanto, l'impregnazione del filato è più difficoltosa, quindi, viene sempre meno la capacità legante e di trasferimento di carico della resina.

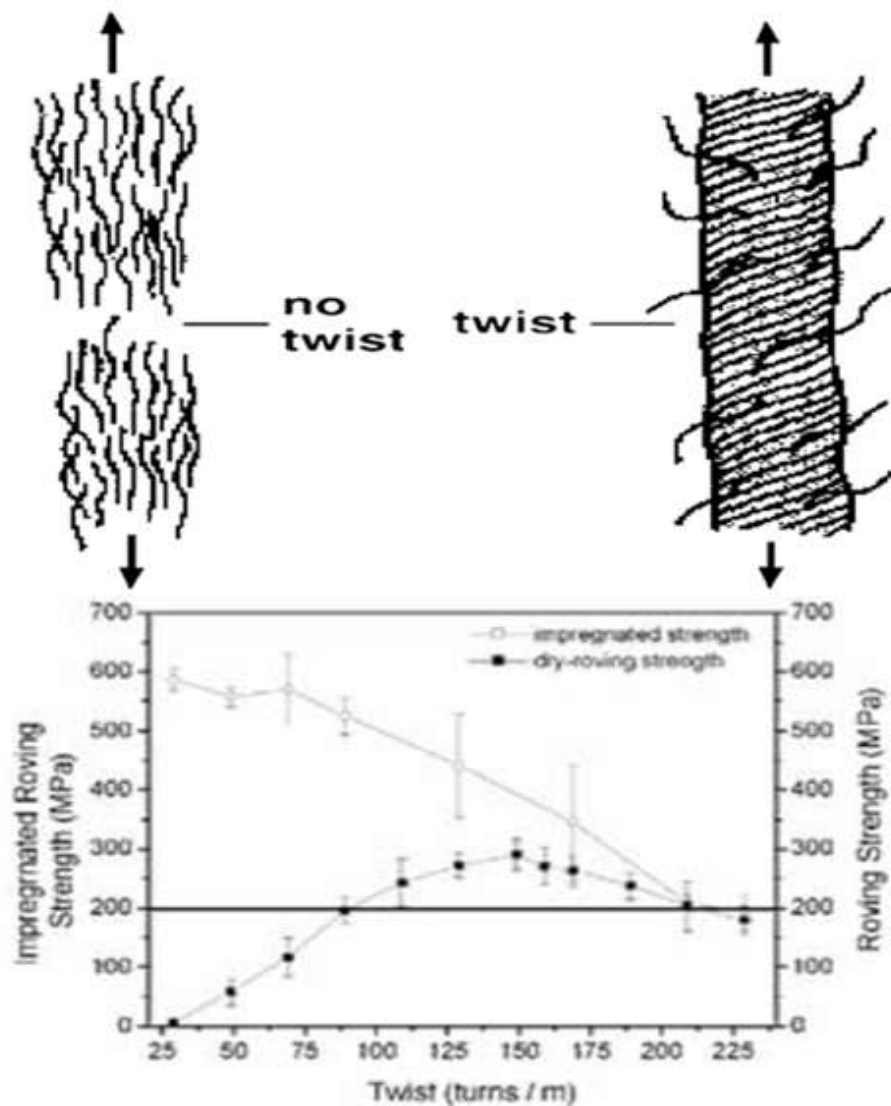



***Fig. 4.67*** *Effetto del livello di torsione sulla resistenza di un filato [60]*

## 4.5.2 EFFETTO DEI TRATTAMENTI APPLICATI ALLE FIBRE

L'effetto dei trattamenti chimici con soda caustica (mercerizzazione) e con amminosilano è stato studiato, prima di riproporlo su scala più ampia ai tessuti e, quindi, ai compositi prodotti, sulle singole fibre e filati dei tessuti adottati.

In particolare le fibre e i filati trattati e testati sono:

- Fibre in bundle dal Mat
- Filati provenienti dal B607
- Filati provenienti dal B6240C.

I filati del Biotex non sono stati trattati, in quanto, come sarà evidente nel seguito della trattazione, l'incremento di proprietà generato dai trattamenti di seguito descritti non giustifica il loro costo, nonché l'impatto ambientale creato, aspetti assolutamente di primaria importanza quando, come nel caso in esame, si opera con tessuti eco-sostenibili di medio-basso costo, rispetto al prezzo dei reagenti chimici.

Per testare preliminarmente l'efficacia del trattamento di mercerizzazione sulle fibre vegetali è stata condotta una fase di trattamento con soda caustica delle sole fibre estratte dal Mat, di cui si riportano in modo sintetico le risultanze sperimentali.

***Tab. 4.4*** *Risultati delle prove di trazione sulle fibre trattate del Mat*

| Mat | Modulo Elastico E (media) | Scarto quadr. medio s | Resistenza a trazione σ max (media) | Scarto quadr. medio s | Allungamento massimo ε max (media) | Scarto quadr. medio s |
|---|---|---|---|---|---|---|
| NaOH | MPa | | MPa | | % | |
| 0% | 28000 | 16800 | 1161,8 | 436,4 | 2,5 | 0,8 |
| 1% | 46200 | 16100 | 1012,8 | 395,6 | 3,7 | 1,4 |
| 3% | 32600 | 18500 | 872,0 | 335,8 | 3,2 | 0,8 |

Per quanto concerne le fibre del Mat ci si è limitati ad un trattamento alle due percentuali del 1% e 3%, perché queste hanno fornito già l'intervallo di trattamento ottimale.

Constatata dunque la concreta efficacia di tale trattamento, si è passato ai trattamenti sui filati dei tessuti. In particolare i tessuti trattati sono:

- B607
- B6240C

Le soluzioni di NaOH in cui sono stati immersi le fibre e i filati sono le seguenti:

- soluzione al 1% di NaOH;
- soluzione al 3% di NaOH;
- soluzione al 5% di NaOH;

.

I trattamenti con amminosilano A1100 sono, invece, tutte le possibili combinazioni tra le soluzioni di trattamento con NaOH (1-3-5%), precedentemente testate, e le soluzioni con percentuale in volume variabile di silano, rispettivamente del 1%, 3% e 5%. In sintesi, il procedimento adottato prevede il trattamento con l'amminosilano A1100 dei campioni di tessuto precedentemente trattati con NaOH per aumentare la quantità specifica di gruppi funzionali reattivi sulle fibre e , quindi, favorire il legame con i silani.

In modo esteso le soluzioni adottate in cui sono stati immersi i tessuti sono le seguenti:

***Tab. 4.5*** *Sintesi di tutti i trattamenti chimici superficiali sui filati dei tessuti B607 e B6240C*

| ***Pretrattamento con NaOH %*** | ***Trattamento con A1100 %*** |
|---|---|
| 1 | 1 |
| | 3 |
| | 5 |
| 3 | 1 |
| | 3 |
| | 5 |
| 5 | 1 |
| | 3 |
| | 5 |

Di seguito si riportano i valori statistici delle serie, ossia i valori medi, lo scarto quadratico medio e l'intervallo di confidenza. E' evidente che per il modulo elastico, la resistenza a trazione e la deformazione a rottura lo scarto attorno al valore medio è notevole, come d'altronde ci si aspettava data la natura eterogenea delle fibre vegetali.

***Tab. 4.6** Risultati delle prove di trazione sui filati dei tessuti B607 trattati*

| B607 | | Modulo Elastico E (media) | Scarto quadr. medios | Resistenza a trazione σ max (media) | Scarto quadr. medios | Allungamento massimo ε max (media) | Scarto quadr. medios |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NaOH** | **A1100** | **MPa** | | **MPa** | | **%** | |
| **0%** | **0%** | **555** | **160** | **598,3** | **118,1** | **9,1** | **1,1** |
| | **1%** | **1770** | **473** | **503,9** | **112,5** | **6,6** | **0,9** |
| | **3%** | **1450** | **366** | **496,4** | **109,6** | **6,5** | **1,3** |
| | **5%** | **2170** | **651** | **447,6** | **62,3** | **5,7** | **1,3** |
| **1%** | **0%** | **1860** | **805** | **453,7** | **105,3** | **6,9** | **1,3** |
| | **1%** | **1820** | **646** | **502,5** | **92,9** | **6,4** | **1,3** |
| | **3%** | **1820** | **473** | **560,5** | **117,9** | **6,4** | **0,7** |
| | **5%** | **2370** | **801** | **479,2** | **120,0** | **5,8** | **1,2** |
| **3%** | **0%** | **1160** | **427** | **533,5** | **136,9** | **7,9** | **1,6** |
| | **1%** | **1760** | **446** | **473,7** | **102,4** | **6,5** | **0,9** |
| | **3%** | **1550** | **557** | **446,8** | **88,3** | **6,5** | **1,2** |
| | **5%** | **1250** | **334** | **411,8** | **84,2** | **6,4** | **1,1** |
| **5%** | **0%** | **731** | **178** | **477,6** | **100,5** | **7,0** | **0,9** |
| | **1%** | **1340** | **344** | **403,1** | **65,8** | **6,9** | **1,1** |
| | **3%** | **1330** | **298** | **523,8** | **110,8** | **7,3** | **1,3** |
| | **5%** | **2120** | **628** | **540,8** | **102,9** | **6,7** | **0,9** |

Si riportano di seguito, a titolo puramente esplicativo, due diagrammi sfrozo-deformazione per i filati del B607 rispettivamente non trattato etrattato al 5% di NaOH e 3% A1100.

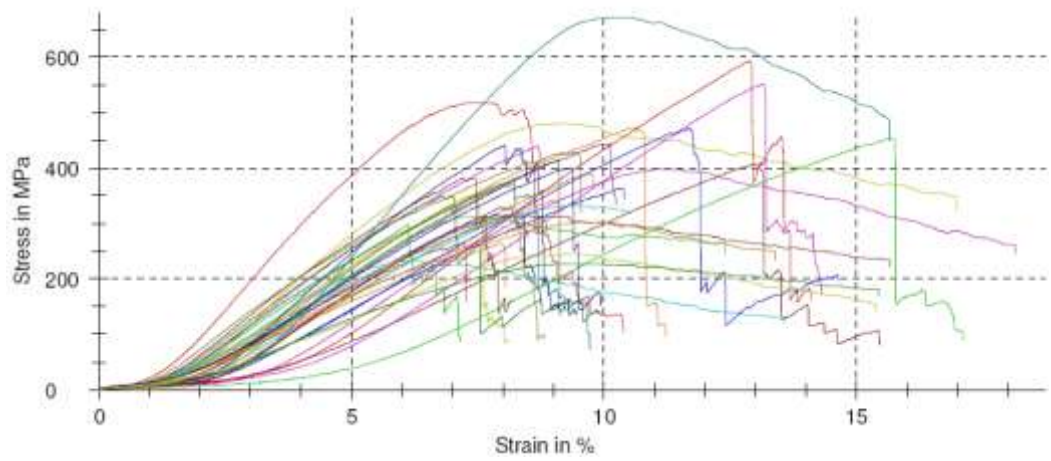



***Fig. 4.68*** *Test di trazione sui filati ritorti del tessuto B07*

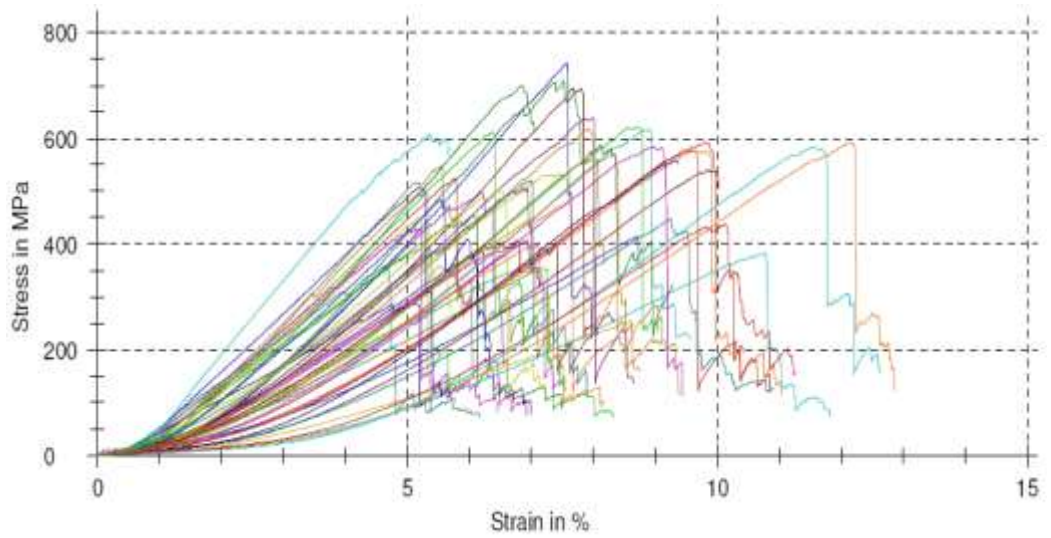



***Fig. 4.69*** *Test di trazione sui filati ritorti del tessuto B07 trattato con NaOH al 5% e A1100 al 3%*

***Tab. 4.7** Risultati delle prove di trazione sui filati dei tessuti B6240C trattati*

| B6240C | | Modulo Elastico E (media) | Scarto quadr. medios | Resistenza a trazione σ max (media) | Scarto quadr. medios | Allungamento massimo ε max (media) | Scarto quadr. medios |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NaOH | A1100 | MPa | | MPa | | % | |
| 0% | 0% | 1700 | 606 | 384,0 | 59,5 | 7,0 | 0,8 |
| | 1% | 6550 | 1530 | 389,5 | 62,8 | 5,4 | 0,6 |
| | 3% | 2690 | 675 | 394,4 | 62,0 | 6,4 | 0,8 |
| | 5% | 6760 | 2410 | 355,2 | 81,8 | 4,3 | 1,0 |
| 1% | 0% | 2050 | 1000 | 390,3 | 85,9 | 6,0 | 0,9 |
| | 1% | 4160 | 1210 | 446,6 | 82,5 | 6,3 | 0,8 |
| | 3% | 4590 | 1400 | 440,6 | 80,5 | 5,8 | 0,9 |
| | 5% | 5390 | 1570 | 355,0 | 63,9 | 5,4 | 0,7 |
| 3% | 0% | 3960 | 1150 | 348,2 | 88,4 | 5,7 | 1,2 |
| | 1% | 4180 | 1250 | 417,4 | 85,4 | 5,7 | 0,9 |
| | 3% | 5990 | 1280 | 424,5 | 78,2 | 5,4 | 0,7 |
| | 5% | 6240 | 2040 | 396,9 | 70,1 | 5,2 | 0,8 |
| 5% | 0% | 4310 | 1400 | 391,0 | 60,3 | 5,3 | 0,6 |
| | 1% | 4840 | 1190 | 433,7 | 74,2 | 5,8 | 0,8 |
| | 3% | 3790 | 877 | 364,4 | 84,3 | 5,8 | 0,7 |
| | 5% | 9830 | 2560 | 491,1 | 104,8 | 4,4 | 0,9 |

Tutti i trattamenti chimici hanno comportato una riduzione del peso variabile tra 1-4% a seconda del tipo e della concentrazione dei reagenti. I trattamenti spinti con soda caustica sono stati quellli che hanno portato alla maggiore perdita di peso. Anche i trattamenti con solo amminosilano hanno comportato una perdita di peso per la dissoluzione, a causa della soluzione di prova acida, di alcuni componenti, soprattutto superficiali dei filati, quale l'appretto impiegato dai produttori per conferire ai tessuti tessili caratteristiche che ne migliorino l'aspetto, il tatto o particolari proprietà, di

cui però non si conosce la natura e la composizione, per ovvie ragioni industriali.

L'effetto dei trattamenti è ben visibile nelle proprietà dei filati in cui si osserva un netto aumento della rigidezza e un contemporaneo decremento della resistenza a trazione e dell'allungamento massimo. Ovviamente i valori di modulo elastico e di resistenza massima sono nettamente inferiori a quellli attesi, come è facilmente intuibile dai valori di letteratura inseriti nel capitolo 1, per cui le prove sui singoli filati sono state considerate come un valido indice dell'efficacia del trattamento, rimandando però il giudizio definitivo alle proprietà meccaniche dei compositi in cui tali tessuti trattati vengono utilizzati.

In definitiva, le prove meccaniche sui filati servono a motivare la scelta di un particolare trattamento, senza però fornire garanzie sull'incremento contestuale e proporzionale di proprietà meccaniche del composito. Questo vuol dire che ovviamente un icremento di modulo elastico del filato pari, ad esempio, a tre volte quello base, non si traduce in un incremento automatico di tre volte del modulo del composito perché il filato è una componente percentuale del composito, quindi influisce per la sua presenza in volume (regola delle miscele), ed inoltre occorre verificare che i trattamenti influsicono anche sulla compatibilizzazione della fibra con la resina, non solo in termini di legami chimici, motivo per cui sono stati impiegati gli amminosilani, ma anche di natura fisica, agendo sui meccanismi di adesione che dipendono dal grado di scabrezza superficiale delle fibre.

Per facilitare la lettura e la comprensione delle prove di trazione sui filati, sono stati riportati i dati su dei diagrammi suddivisi per classe di trattamento con soda caustica.

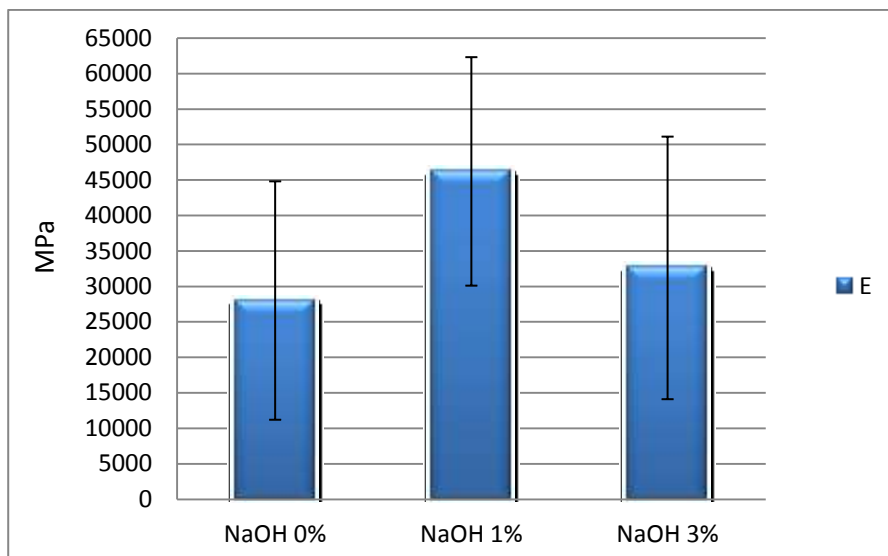



***Fig. 4.70*** *Effetto del trattamento superficiale con NaOH sul modulo elastico delle fibre estratte dal Mat*

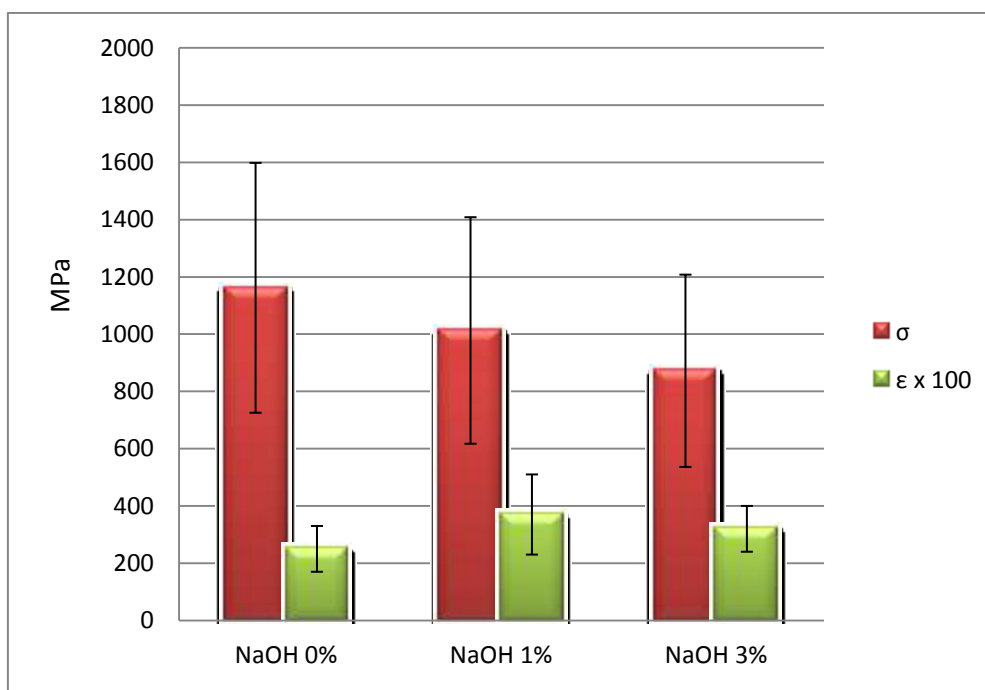



***Fig. 4.71*** *Effetto del trattamento superficiale con NaOH sulla massima tensione e allungamento a rottura delle fibre estratte dal Mat*

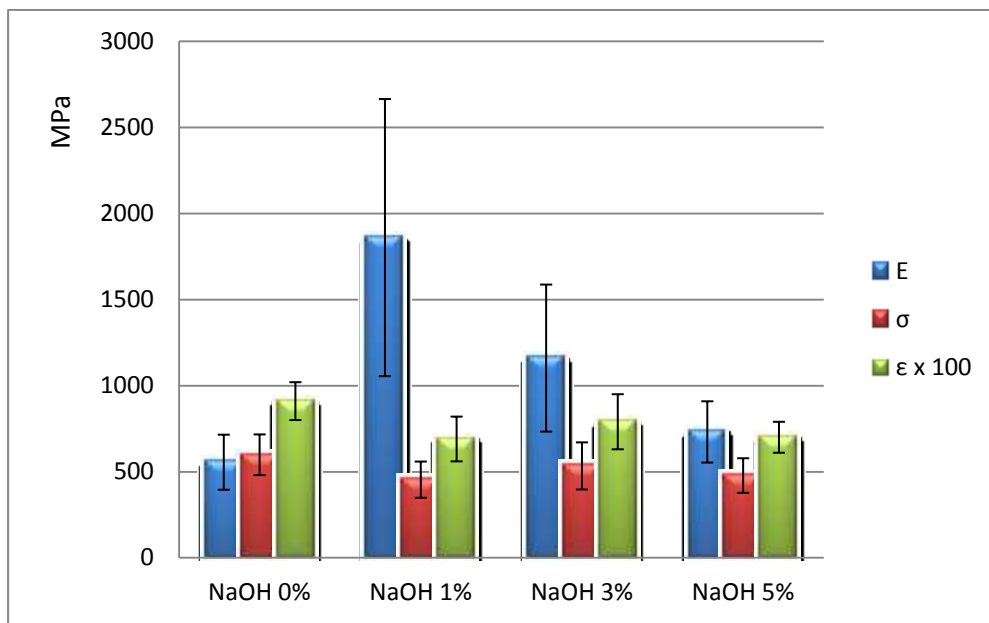



***Fig. 4.72*** *Effetto del trattamento superficiale con NaOH sulle proprietà meccaniche a trazione dei filati estratti dal tessuto B607*

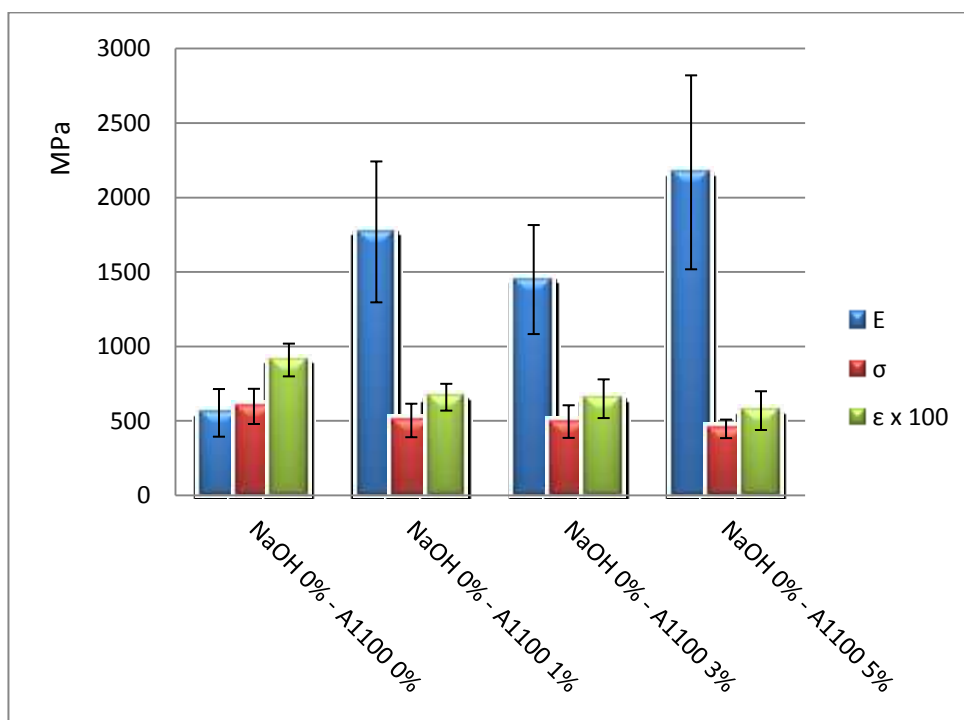



***Fig. 4.73*** *Effetto del trattamento superficiale con A1100 sulle proprietà meccaniche a trazione dei filati estratti dal tessuto B607*

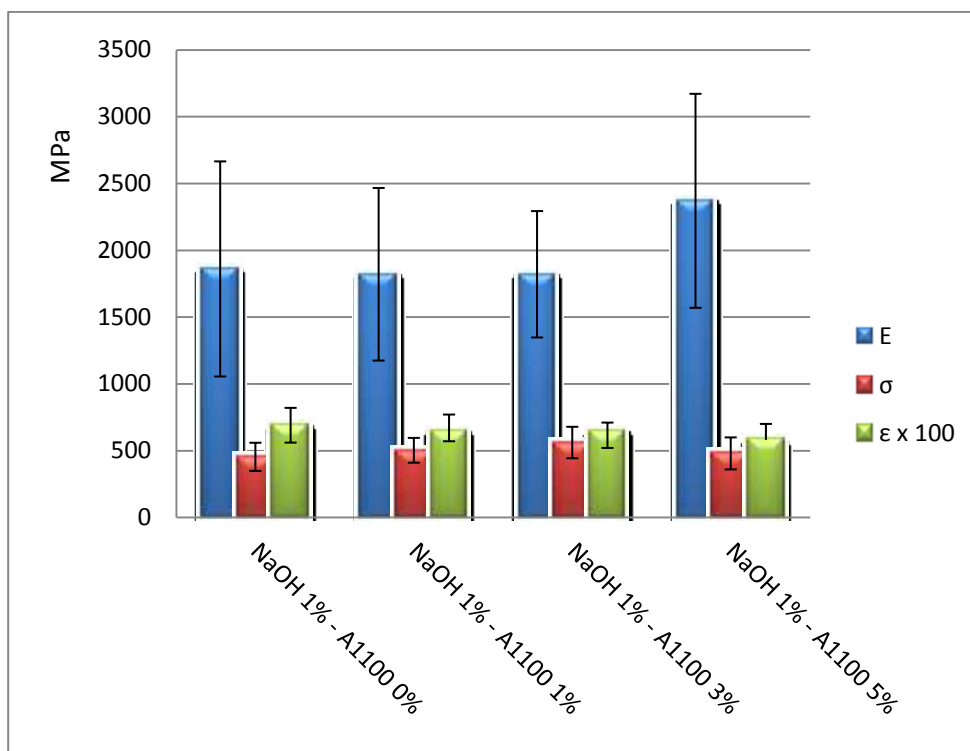



***Fig. 4.74*** *Effetto del trattamento superficiale combinato con NaOH al 1% e A1100 a diverse percentuali sulle proprietà meccaniche a trazione dei filati estratti dal tessuto B607*

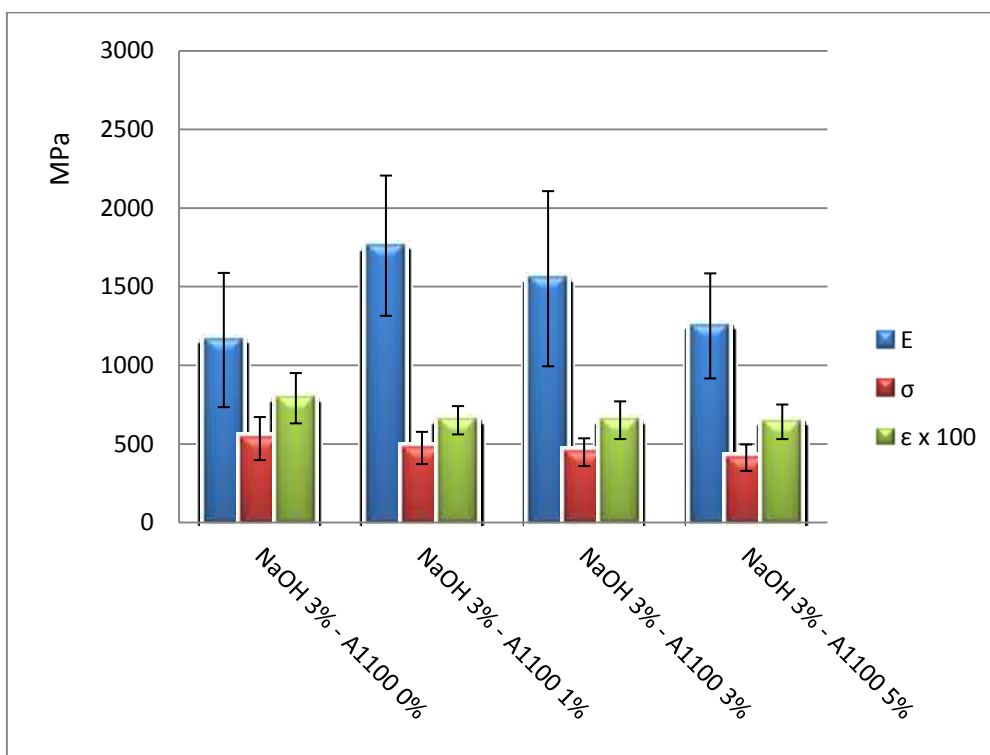



*Fig. 4.75* *Effetto del trattamento superficiale combinato con NaOH al 3% e A1100 a diverse percentuali sulle proprietà meccaniche a trazione dei filati estratti dal tessuto B607*

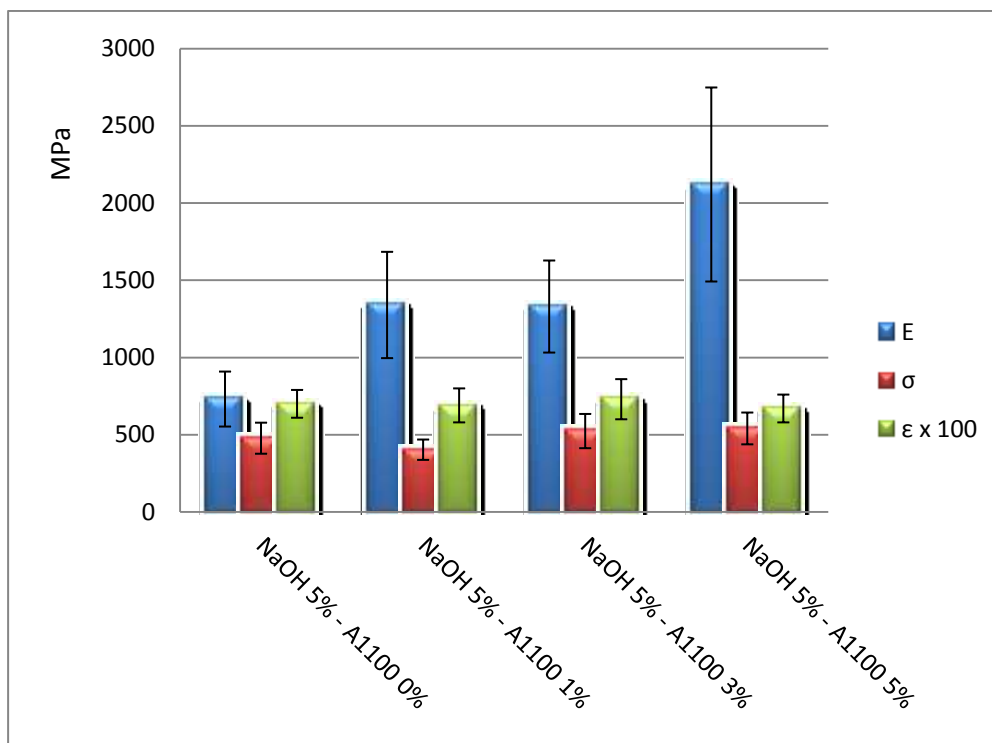



***Fig. 4.76*** *Effetto del trattamento superficiale combinato con NaOH al 5% e A1100 a diverse percentuali sulle proprietà meccaniche a trazione dei filati estratti dal tessuto B607*

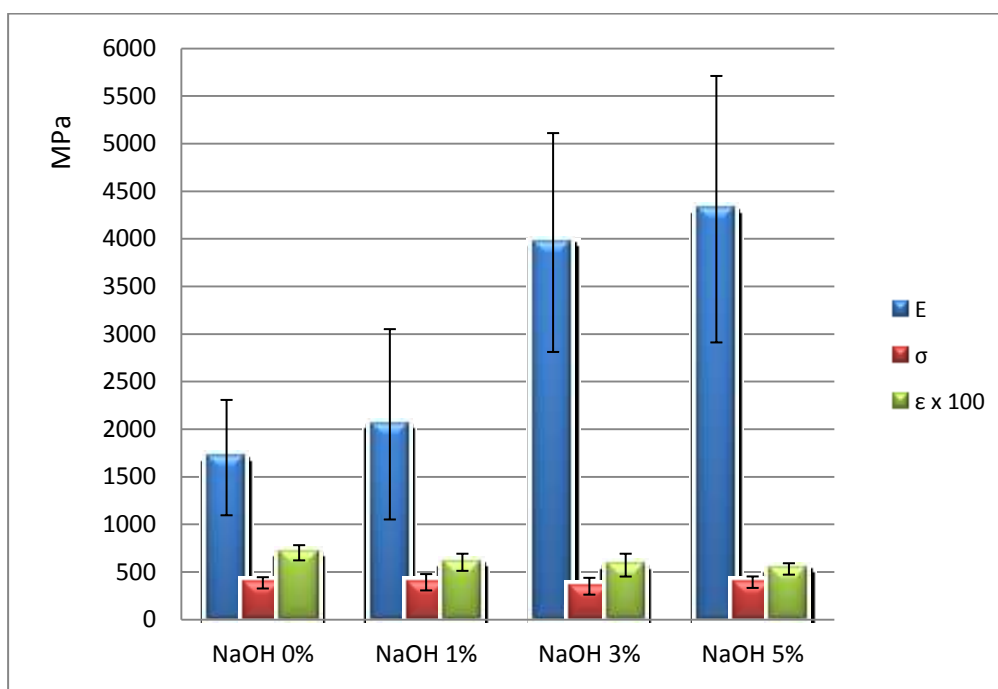



***Fig. 4.77*** *Effetto del trattamento superficiale con NaOH sulle proprietà meccaniche a trazione dei filati estratti dal tessuto B6240C*

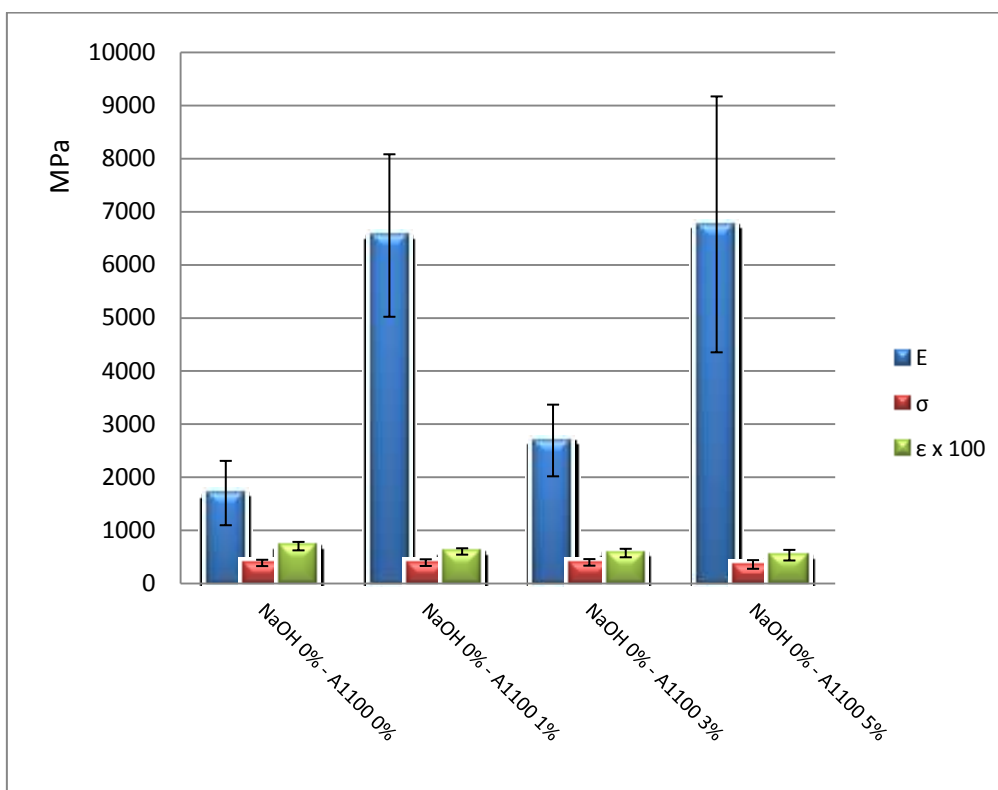



***Fig. 4.78*** *Effetto del trattamento superficiale con A1100 sulle proprietà meccaniche a trazione dei filati estratti dal tessuto B6240C*

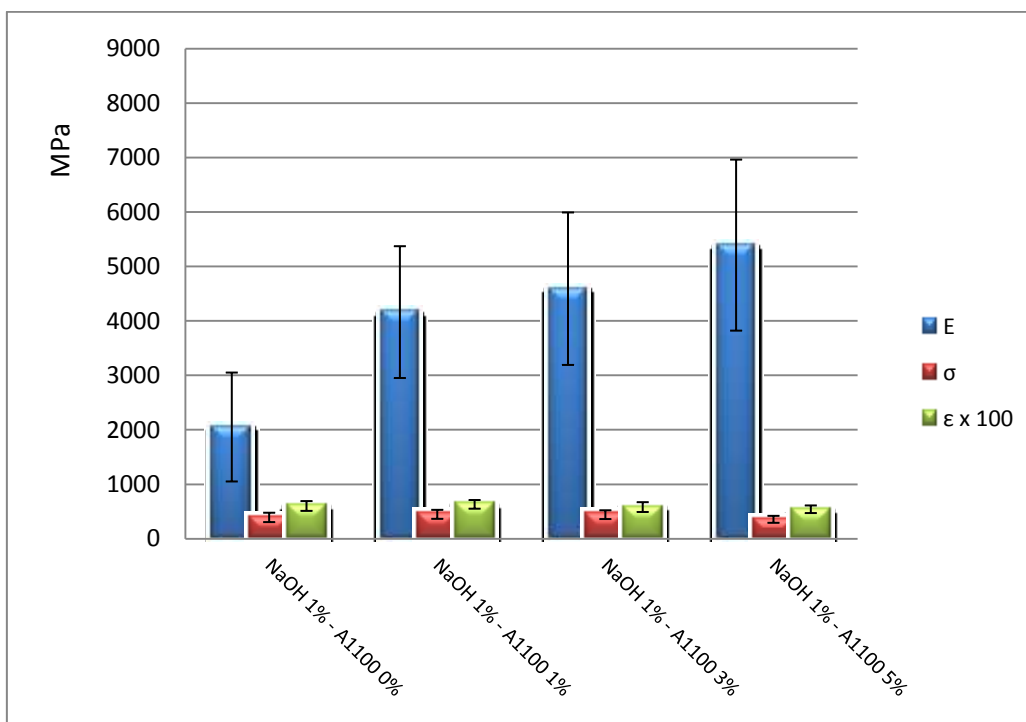



***Fig. 4.79*** *Effetto del trattamento superficiale combinato con NaOH al 1% e A1100 a diverse percentuali sulle proprietà meccaniche a trazione dei filati estratti dal tessuto B6240C*

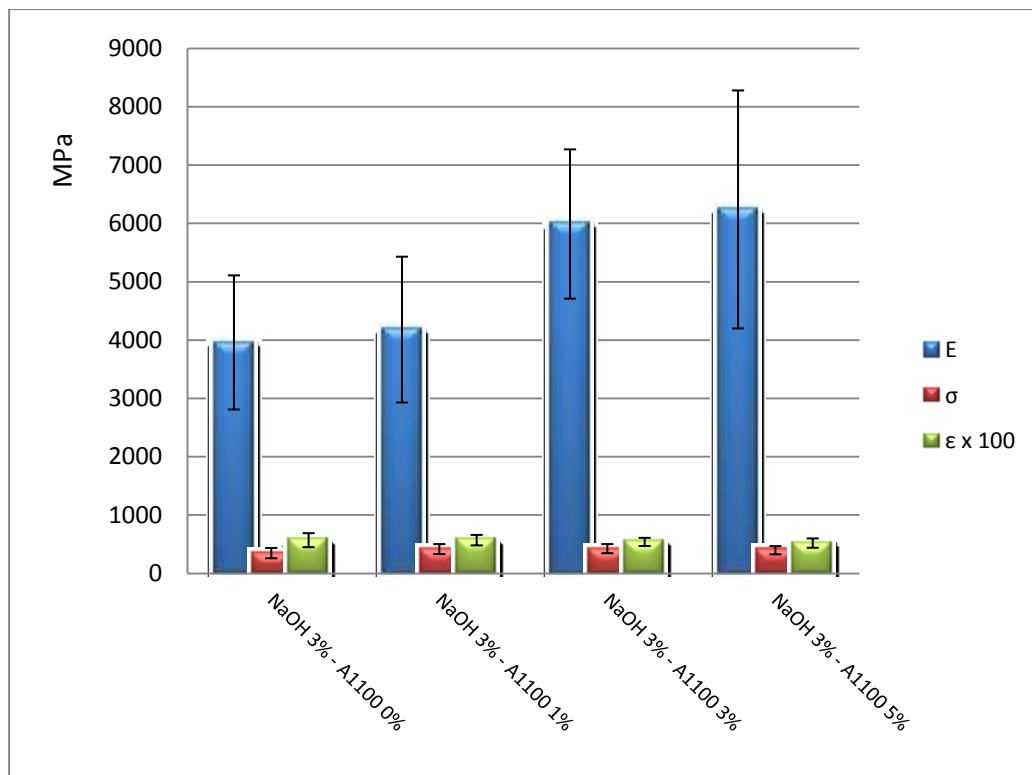



***Fig. 4.80*** *Effetto del trattamento superficiale combinato con NaOH al 3% e A1100 a diverse percentuali sulle proprietà meccaniche a trazione dei filati estratti dal tessuto B6240C*

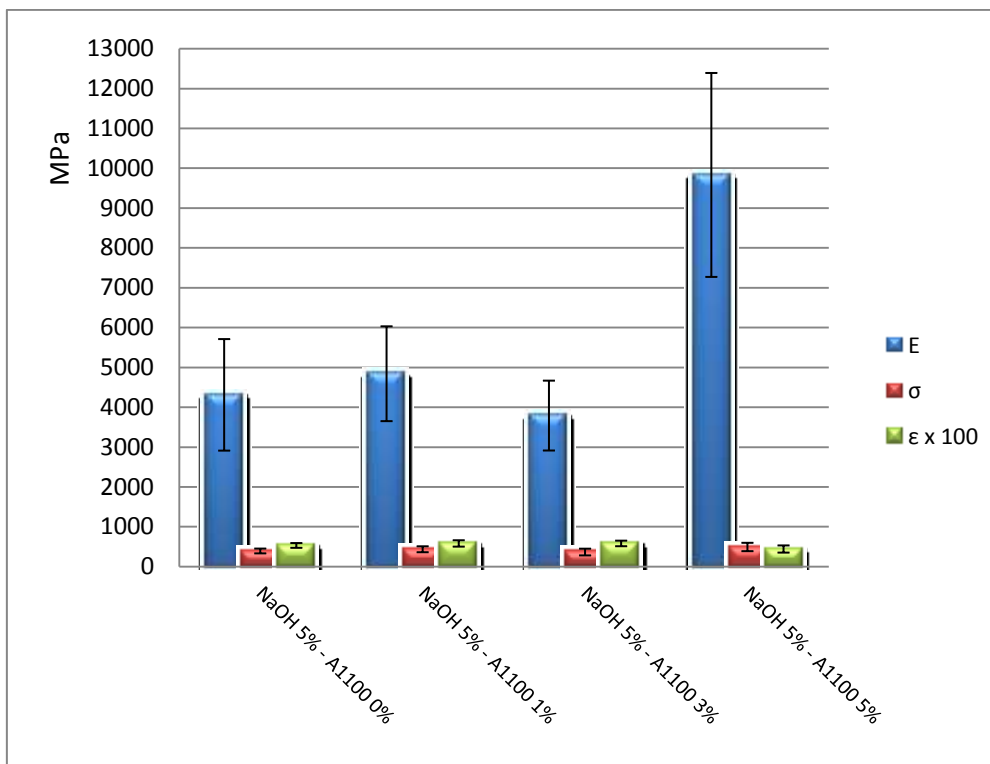



***Fig. 4.81*** *Effetto del trattamento superficiale combinato con NaOH al 5% e A1100 a diverse percentuali sulle proprietà meccaniche a trazione dei filati estratti dal tessuto B6240C*

Dai risultati ottenuti, si evince che per i filati del tessuto B607, come d'altronde ci si aspettava valutando l'effetto migliorativo dei trattamenti sulle fibre estratte dal Mat, il modulo elastico, rispetto al tessuto non trattato, è sempre maggiore in tutti i trattamenti applicati, raggiungendo un massimo nel trattamento combinato con NaOH 1% - A1100 5%; per la resistenza a trazione, invece, si sono registrati valori sempre inferiori, con punte del 15%, rispetto alla fibra non trattata. Quanto alla massima deformazione, si nota che per tutti i trattamenti si hanno valori più bassi, in termini percentuali, rispetto alla fibra non trattata, proprio perché la fibra si irrigidisce e al tempo stesso la tensione di rottura decresce.

Per quanto concerne i filati B6240C, anche in questo caso, il modulo elastico, per tutti i trattamenti, risulta notevolmente superiore a quello delle fibre non trattate, raggiungendo il valore massimo nel trattamento combinato con NaOH 5% - A1100 5%. La resistenza a trazione, a differenza di quanto avviene per il B607, registra un aumento per tutti i trattamenti. La massima deformazione risulta, invece, sempre

inferiore per tutti i trattamenti applicati rispetto al valore del filato non trattato.

### 4.5.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA RESINA : DENSITÁ, PROPRIETÁ MECCANICHE A TRAZIONE E VISCO-ELASTICHE A FLESSIONE

Di seguito si riporta il diagramma sforzo-deformazione relativo alla prova di trazione sulla resina, condotta su un campione di 5 provini.

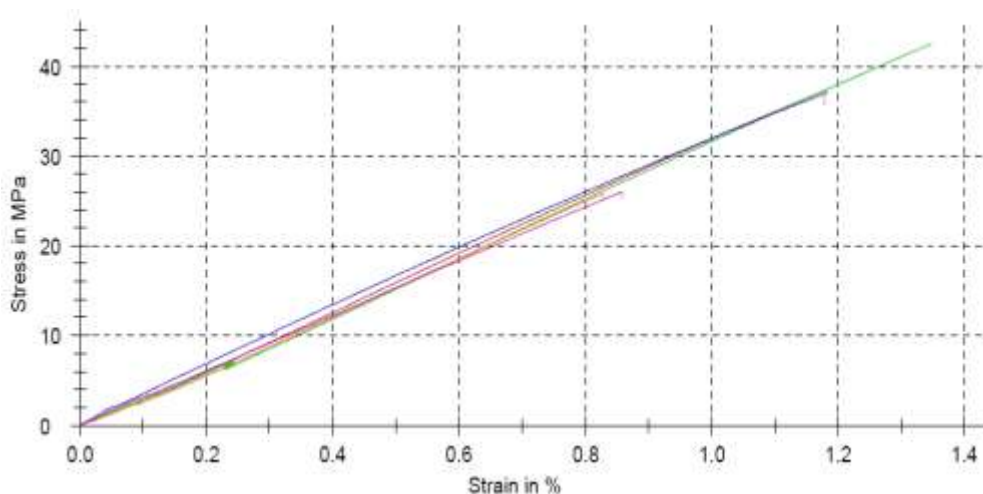



***Fig. 4.82*** *Diagramma sforzo di trazione-deformazione per la resina PRIME 20 LV reticolata a 50°C per 20 ore*

Il comportamento della resina, reticolata a 50°C per 20 ore, è di tipo elasto-fragile, ossia non mostra alcun comportamento plastico. Il modulo elastico a trazione è stato, quindi, valutato come la pendenza della retta tangente al diagramma in corrispondenza deformazione pari allo 0,05%.

Da notare che la resina possiede resistenza a trazione, modulo elastico e allungamento massimo notevolmente inferiori alle fibre e ai filati utilizzati. Tale evidenza, in accordo con la *regola delle miscele* per la previsione delle proprietà meccaniche dei compositi, è alla base delle limitate proprietà a trazione dei compositi che sono stati prodotti e testati, come meglio evidenziato nel prosieguo della trattazione.

Nella seguente figura è possibile osservare l'andamento delle prove DMA eseguite, all'interno dell'intervallo di temperatura 25-140°C, sulle provette di resina opportunamente tagliate. In particolare si osserva la variazione del modulo elastico E e della tan $\delta$ in funzione della temperatura.

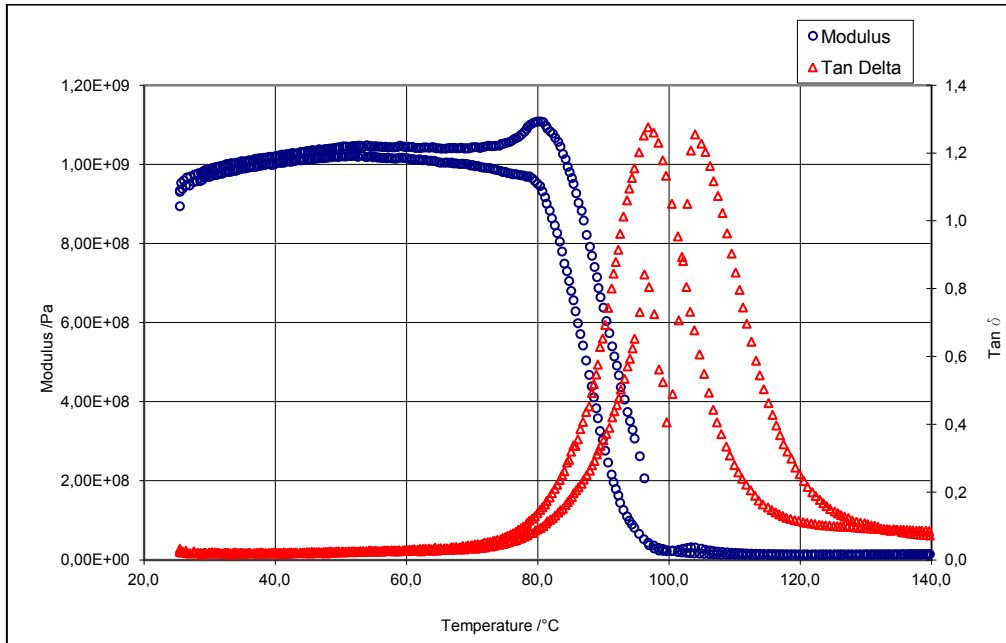



***Fig. 4.83*** *Diagramma relativo all'analisi DMA di una provetta di resina PRIME 20 LV reticolata a 50°C per 20 ore*

Nella seguente tabella sono riassunte le proprietà fisiche e meccaniche della resina reticolata a 50°C per 20 ore.

***Tab. 4.8*** *Proprietà fisiche e meccaniche della resina PRIME 20LV reticolata a 50°C per 20 ore*

| GRANDEZZA | U.D.M. | VALORE | s.q.m. |
|---|---|---|---|
| $\rho$ | [g/cm$^3$] | 1,093 | - |
| E | [GPa] | 1,71 | 0,31 |
| $\sigma_u$ | [MPa] | 33,75 | 7,46 |
| $\varepsilon$ | [%] | 1,1 | 0,2 |
| $T_g$ (picco di tgd) | [C°] | 96,2 | - |
| $T_{g1}$ | [C°] | 80,5 | - |
| $T_{g\ ult}$ | [C°] | 96,9 | - |

## 4.5.4 PRODUZIONE DEI LAMINATI IN COMPOSITO

Successivamente alla fase di caratterizzazione dei costituenti sono stati realizzati numerosi laminati in materiale composito, utilizzando i due processi produttivi descritti in precedenza.

Nella fattispecie, il primo processo produttivo utilizzato è stato il Resin Transfer Molding (RTM) che ha permesso di raggiungere percentuali in volume di rinforzo limitate, in riferimento ai limiti fisici di impaccamento raggiungibili (circa il 75% in volume).

Il secondo processo adottato, ossia il Bag Molding seguito dalla reticolazione in pressa a temperatura controllata di 50°C, ha consentito di raggiungere il limite massimo teorico di fibra in un materiale composito, con percentuali superiori di circa il 30% rispetto al RTM.

Con la tecnica del RTM sono stati realizzati alcuni laminati rinforzati da tessuti precedentemente trattati con le combinazioni di NaOH e Amminosilano A1100. In particolare, considerando la disponibilità di risorse limitate, si è optato per realizzare solo i laminati con quei tessuti trattati con le combinazioni di trattamenti che hanno manifestato i migliori risultati. Nel paragrafo precedente si è osservato che non esiste una combinazione di trattamenti che può essere definita la migliore in senso assoluto, bensi questa considerazione dipende dall'applicazione che si vuole realizzare. Se si pensa però che alle fibre è generalmente demandata la funzione di irrigidire un polimero, è normale che la scelta cada sui trattamenti che determinano il massimo incremento di modulo elastico. Dalla considerazione appena esposta si è optato per i trattamenti con amminosilano A1100 al 5%, variando del pretrattamento con NaOH al 1%, 3% e 5%.

Nella seguente tabella sono riportati i dati relativi ai laminati realizzati in ordine cronologico e per tipologia di tessuto impiegato, utilizzando il processo RTM.

Nella tabella si evince che sono stati realizzati con tale processo solo i laminati rinforzati con i tessuti Mat, B607 e B6240C che sono quelli studiati in relazione ai trattamenti chimici di compatibilizzazione con la resina.

Al fine di poter effettuare un confronto diretto tra i laminati con tessuti trattati e non, si è scelta una percentuale in volume di rinforzo e si è fatto in modo da mantenerla costante in tutte i laminati da confrontare, quindi si è

mantenuto costante il numero di strati di tessuto. La percentuale in volume di rinforzo scelta è quella minima ottenuta per ciascuna tipologia di rinforzo non trattato.

***Tab. 4.9*** *Parametri di processo e proprietà fisiche dei laminati prodotti in RTM*

| | **Iniezione** | **Strati** | **Densità ρ [g/cm³]** | **% rinforzo $V_p$** | **% vuoti $V_v$** | **Spessore [mm]** | **T iniezione [min,sec]** | **P iniezione [bar]** | **Vuoto ausiliario [bar]** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Mat** | 1 | 1 | 1,117 | 14,1 | 0,7 | 3,65 | 4,50 | 1,2 | 0,8 |
| | 2 | 2 | 1,140 | 25,8 | 0,7 | 4,60 | 6,50 | 1,2 | 0,8 |
| **B607** | 1 | 2 | 1,159 | 32,0 | 1,4 | 1,12 | 6,40 | 1,6 | 0,8 |
| | 2 | 3 | 1,172 | 39,0 | 1,7 | 1,37 | 23,55 | 1,0 | 0,8 |
| | 3 | 4 | 1,184 | 43,7 | 1,7 | 1,58 | 12,59 | 1,2 | 0,6 |
| **B607 trattate** | 1 | 2 | 1,148 | 28,3 | 1,5 | 1,19 | 10,05 | 1,1 | 0,3 |
| | 2 | 2 | 1,149 | 30,7 | 1,9 | 1,14 | 3,40 | 1,2 | 0,3 |
| | 3 | 2 | 1,150 | 30,7 | 2,1 | 1,18 | 17,30 | 1,2 | 0,7 |
| **B6240C** | 1 | 3 | 1,144 | 31,0 | 0,9 | 1,32 | 15,20 | 1,1 | 0,5 |
| | 2 | 4 | 1,145 | 38,6 | 1,8 | 1,36 | 7,16 | 1,2 | 0,7 |
| | 3 | 5 | 1,159 | 46,3 | 2,6 | 1,38 | 7,25 | 1,2 | 0,5 |
| **B6240C trattate** | 1 | 3 | 1,145 | 27,2 | 0,1 | 1,32 | 17,04 | 1,2 | 0,3 |
| | 2 | 3 | 1,148 | 29,6 | 0,5 | 1,32 | 7,34 | 1,6 | 0,8 |
| | 3 | 3 | 1,177 | 26,8 | 1,9 | 1,32 | 20,44 | 1,2 | 0,3 |

*Nota: Per le lamine con i tessuti trattati, il numero di iniezione assume il seguente significato:* ***1*** *= trattamento con A1100 5%-NaOH 1%;* ***2*** *= trattamento con A1100 5% - NaOH 3%;* ***3*** *= trattamento con A1100 5% - NaOH 5%*

L'eperienza di laboratorio ha, quindi, dimostrato che al crescere del numero dei tessuti, a parità di coppia di serraggio dello stampo, generalmente si osserva una diminuzione della permeabilità all'interno dello stampo per effetto della maggiore presenza di fibre, quindi, di ostacolo al flusso, per cui è necessario incrementare la pressione di iniezione a parità di tempo impiegato per la completa iniezione, monitorata mediante la fuoriuscita di resina dai canali posti agli antipodi di quelli di ingresso (iniezione). Tale evidenza presenta delle volte alcune eccezioni, poiché per quanto omogenei possano essere i tessuti, in realtà sono presenti delle zone a maggiore densità che determinano un abbassamento di permeabilità. All'aumentare della pressione, quindi in generale della

velocità di iniezione, si corre però il rischio di realizzare dei pezzi che in alcuni punti non risultano completamente impreregnati. Tale risultato è dovuto al fatto che la resina all'interno dello stampo non avanza con fronte uniforme dovuto alla creazione di percorsi preferenziali, lungo i bordi, a minore resistenza.

La realizzazione di un laminato in composito è, quindi, il giusto equilibrio tra pressione di iniezione, vuoto ausiliario (per eliminare l'aria intrappolata, quindi, facilitare il flusso di resina) e tempo di iniezione.

In conclusione, si può affermare che non esiste una relazione diretta tra pressione- tempi di iniezione perché comunque i tessuti di fibre vegetali, per quanto prodotti con tecniche di controllo sofisticate, offrono sempre una significativa variazione di densità areale che influiscono sulla permeabilità dei tessuti.

L'evidenza sperimentale ha però portato a concludere che è meglio operare a pressioni ridotte, prossime a 1,5 bar, per realizzare un flusso uniforme e quindi garantire la completa impregnazione su tutta la superficie dello stampo, anche a costo di un incremento significativo del tempo di iniezione.

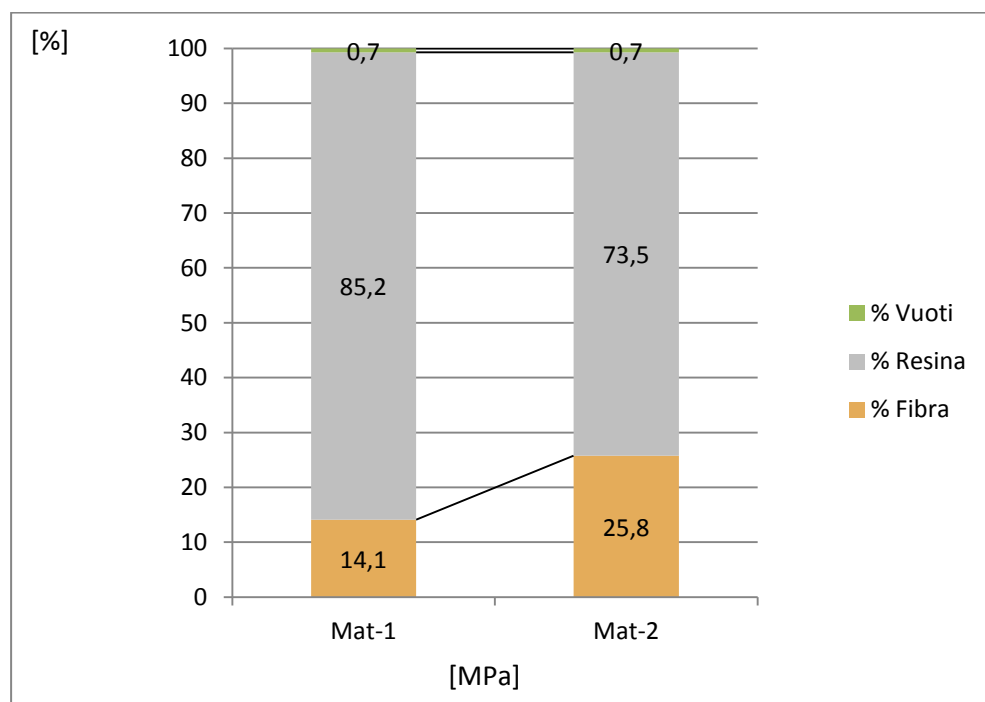



***Fig. 4.84*** *Composizione per frazione volumetrica dei laminati in Mat prodotti in RTM*

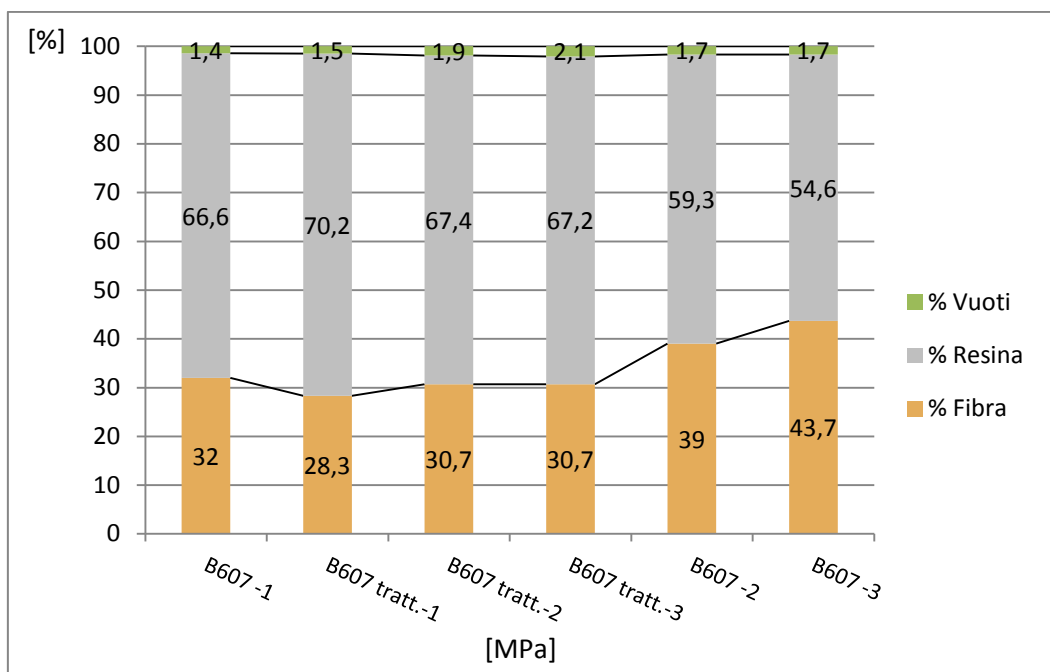



***Fig. 4.85*** *Composizione per frazione volumetrica dei laminati in B607 prodotti in RTM*

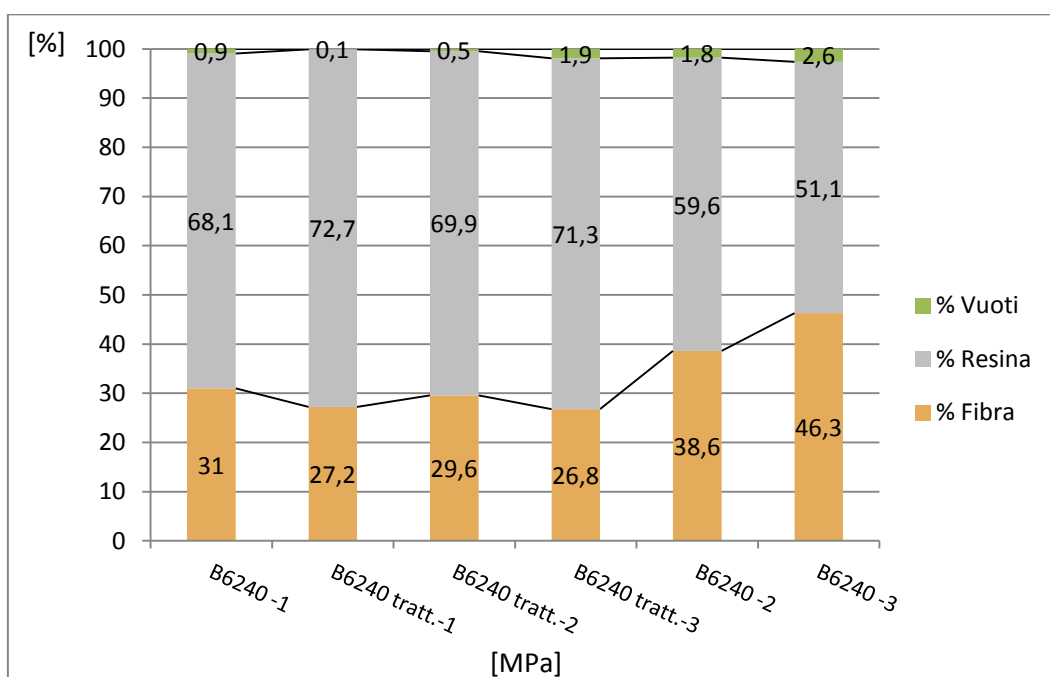



***Fig. 4.86*** *Composizione per frazione volumetrica dei laminati in B6240C prodotti in RTM*

Dai diagrammi appena esposti si evince che è possibile aumentare la frazione volumetrica di fibra all'interno del composito, impiegando il processo RTM, fino ad un limite variabile da circa il 25% per i laminati in Mat, a circa il 44% e 46% rispettivamente per i laminati in B607 e B6240C.

Tale limite è sancito dalla limitata pressione di compattazione che può essere esercitata all'interno dello stampo e, quindi, sui tessuti agendo semplicemente sul serraggio dei bulloni che vincolano lo stampo al controstampo.

Un'altra importante evidenza è che con i tessuti non tessuti ad orientazione random nel piano non è possibile raggiungere elevate frazioni volumetriche in fibra e, comunque, notevolmente inferiori a quelle raggiungibili con i tessuti di filati ritorni, quali il B607 e il B6240C. Il motivo risiede sia nella natura della fibra/filato che nell'organizzazione spaziale nel tessuto: il filato non solo possiede un elevato addensamento di fibre per il fatto che queste vengono ritorte una sull'altra, ma essendo disposte nel tessuto in modo ordinato (trama e ordito) determinano una minore presenza di spazi lasciati liberi ("vuoti"). Questi spazi tra l'altro possono essere benissimo colmati dalla sovrapposizione di più tessuti uno sull'altro, cosa che invece non accade nei tessuti ad orientazione random.

La presenza dei vuoti aumenta al crescere della frazione volumetrica di fibra perché la fibra porta con se i vuoti costituiti dalla regione del *lumen* che difficilmente vengono ridotti dalle "esigue" pressioni di compattazione.

Nella tabella seguente sono, invece, riportati i laminati con il processo del Bag Molding seguito da reticolazione in pressa.

Il livello di vuoto raggiunto all'interno dello stampo è costante per tutti i laminati prodotti, pari a circa -0,3 bar.

I laminati sono stati prodotti facendo variare la pressione di compattazione in pressa da 0 MPa a 5-10-15-25 MPa, mantenendo costante il numero di tessuti impiegati, scelto comunque in modo da ottenere uno spessore sufficientemente elavato per la rilevazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche.

I pannelli "Biotex Random" sono quelli realizzati con i tessuti Biotex disposti senza prestare attenzione alla disposizione dell'ordito e della trama, al fine di verificare se il tessuto ha una direzione preferenziale di rinforzo.

***Tab. 4.10*** *Parametri di processo e proprietà fisiche dei laminati prodotti in Bag Molding seguito da reticolazione per 20 ore in pressa riscaldata a 50°C*

| | Iniezione | Strati | Densità ρ [g/cm$^3$] | % rinforzo $V_p$ | % vuoti $V_v$ | Spess. [mm] | T iniezione medio [min] | Vuoto [bar] | P pressa [MPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B607 | 1 | 9 | 1,099 | 33,8 | 6,5 | 4,45 | 55 | 0,3 | 0 |
| | 2 | | 1,195 | 48,3 | 0,8 | 3,04 | | | 5 |
| | 3 | | 1,210 | 53,0 | 0,4 | 2,76 | | | 10 |
| | 4 | | 1,220 | 59,0 | 0,8 | 2,55 | | | 15 |
| | 5 | | 1,246 | 68,9 | 0,6 | 2,62 | | | 25 |
| B6240C | 1 | 12 | 1,118 | 35,4 | 2,7 | 4,45 | 63 | 0,3 | 0 |
| | 2 | | 1,161 | 46,8 | 0,4 | 3,22 | | | 5 |
| | 3 | | 1,175 | 54,1 | 0,2 | 2,79 | | | 10 |
| | 4 | | 1,189 | 62,1 | 0,1 | 2,56 | | | 15 |
| | 5 | | 1,202 | 72,9 | 0,5 | 2,30 | | | 25 |
| BIOTEX | 1 | 5 | 1,083 | 27,1 | 8,4 | 4,80 | 32 | 0,3 | 0 |
| | 2 | | 1,218 | 48,2 | 1,8 | 2,72 | | | 5 |
| | 3 | | 1,236 | 51,7 | 1,1 | 2,52 | | | 10 |
| | 4 | | 1,233 | 50,5 | 1,0 | 2,56 | | | 15 |
| | 5 | | 1,275 | 63,1 | 0,6 | 2,05 | | | 25 |
| BIOTEX random | 1 | 5 | 1,090 | 31,6 | 8,9 | 4,11 | 34 | 0,3 | 0 |
| | 2 | | 1,223 | 46,8 | 0,9 | 2,78 | | | 5 |
| | 3 | | 1,235 | 51,8 | 0,8 | 2,51 | | | 10 |
| | 4 | | 1,252 | 56,1 | 0,8 | 2,35 | | | 15 |
| | 5 | | 1,291 | 68,0 | 0,4 | 2,10 | | | 25 |

Dalla tabella si evince come il processo combinato di Bag Molding - Hot Press Curing possa garantire il raggiungimento delle percentuali in volume di rinforzo estreme. Operando a parità di numero di tessuti disposti nello stampo, le percentuali maggiori si raggiungono per una pressione di compattazione di 25 MPa. Per tutti e tre i tessuti di rinforzo, la percentuale massima si aggira all'interno dell'intervallo compreso tra il 68,0% del Biotex, secondo una disposizione random dei tessuti, e il 72,9% del tessuto B6240C.

La seguente tabella mostra le differenze di percentuale in volume di rinforzo, tra i migliori laminati in RTM e in Bag Molding, che si aggira

attorno al 25%, determinando, come evidenziato nel prosieguo della trattazione, una sensibile differenza di proprietà meccaniche. C'è da dire che la differenza di proprietà meccaniche è da attribuire anche alla minore percentuale in volume di vuoti che si ottiene nei laminati prodotti in Bag Molding e successivamente reticolati in pressa.

***Tab. 4.11*** *confronto delle percentuali in volume di rinforzo tra i laminati in RTM e quelli in Bag Molding*

| Tessuto di rinforzo | % rinforzo $V_p$ | | Δ % |
|---|---|---|---|
| | RTM | Bag Molding | |
| **B607** | 43,7 | 68,9 | 25,2 |
| **B6240C** | 46,3 | 72,9 | 26,6 |
| **BIOTEX** | - | 63,1 | - |
| **BIOTEX random** | - | 68,0 | - |

La tabella 4.10 permette anche di comprendere la sensibile differenza tra i tempi di iniezione in RTM e in Bag Molding. Tale differenza è da attribuire alle pressioni di iniezione. Infatti, nel RTM si opera con una pressione relativa positiva, quindi la resina viene spinta a passare attraverso la cavità dello stampo, con l'ausilio di una pressione relativa negativa che in teoria serve solo ad eliminare l'aria dalle cavità del tessuto, ma di fatto si somma alla pressione positiva. Nel Bag Molding, invece, il flusso è innescato dal vuoto creato all'interno dello stampo, ossia dalla pressione relativa negativa generata da una pompa da vuoto. In definitiva, nel Bag Molding la pressione che innesca il flusso è fino a 7 volte inferiore a quella complessiva agente nel RTM.

Nei grafici seguenti sono riportati i dati relativi agli spessori misurati, in funzione della pressione di compattazione, utili per poter calcolare le frazioni volumetriche di fibra e matrice in ciascun composito. L'incremento della percentuale in volume di rinforzo è generalmente inversamente proporzionale allo spessore del composito, a meno che alcuni tessuti hanno una densità lievemente inferiore a quella media, come nel caso del B607-4 e del Biotex-3, per cui si verifica uno spessore del laminato inferiore a quelli che possiedono una percentuale di rinforzo superiore, come mostrato dal grafico di figura 4.87.

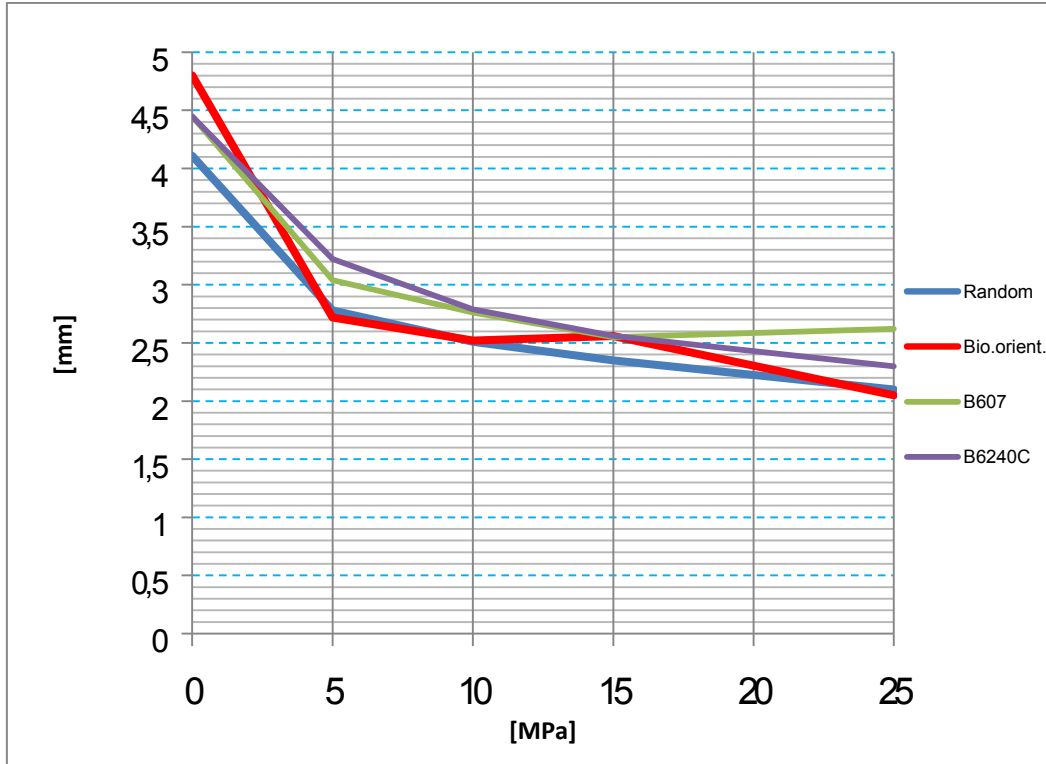



***Fig. 4.87** Andamento degli spessori medi in funzione della pressione di compattazione in fase di reticolazione in pressa*

Nei grafici che seguono si mostra come al variare della pressione di compattazione aumenti la frazione volumetrica della fibra, a scapito della resina, ma anche dei vuoti. Dai calcoli e dalle misure, si evince, inoltre, un aumento della densità del composito.

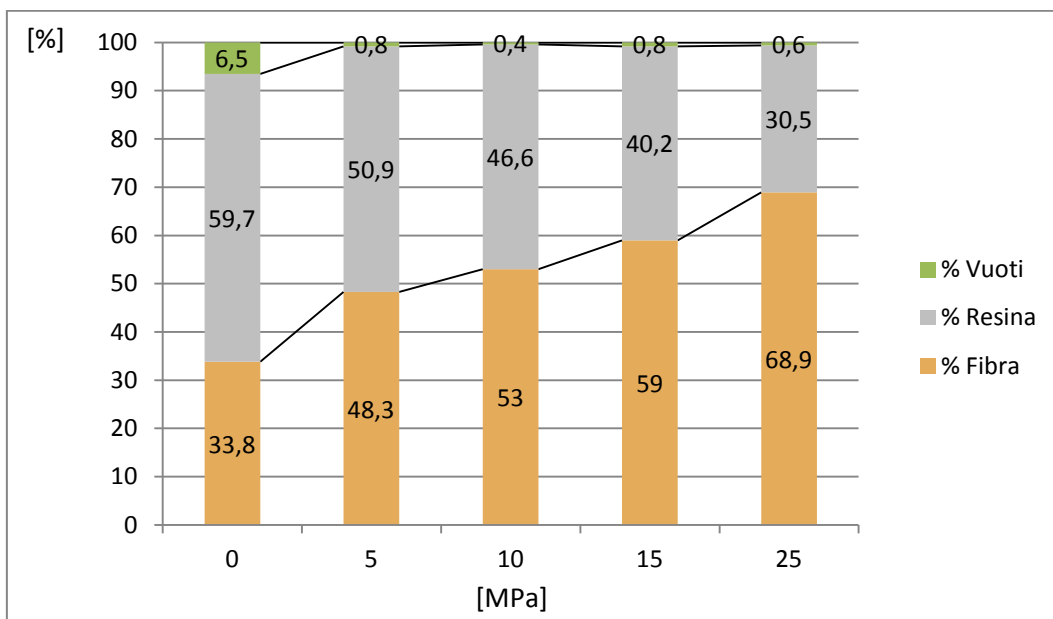



***Fig. 4.88** Composizione per frazione volumetrica dei laminati in B07*

*prodotti in Bag Molding-Hot Press Curing*

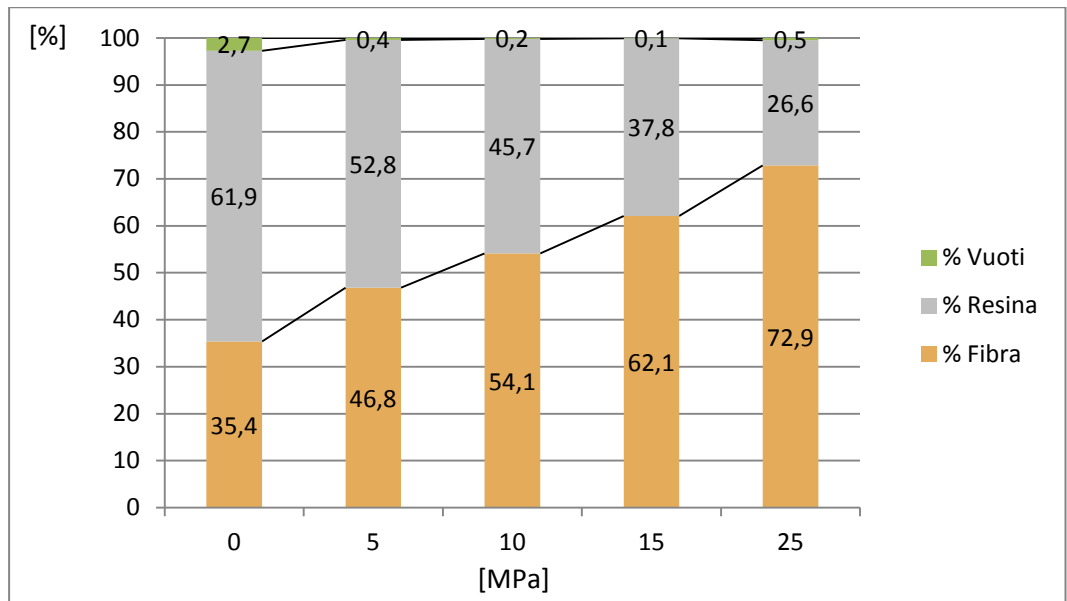



***Fig. 4.88*** *Composizione per frazione volumetrica dei laminati in B6240C prodotti in Bag Molding-Hot Press Curing*

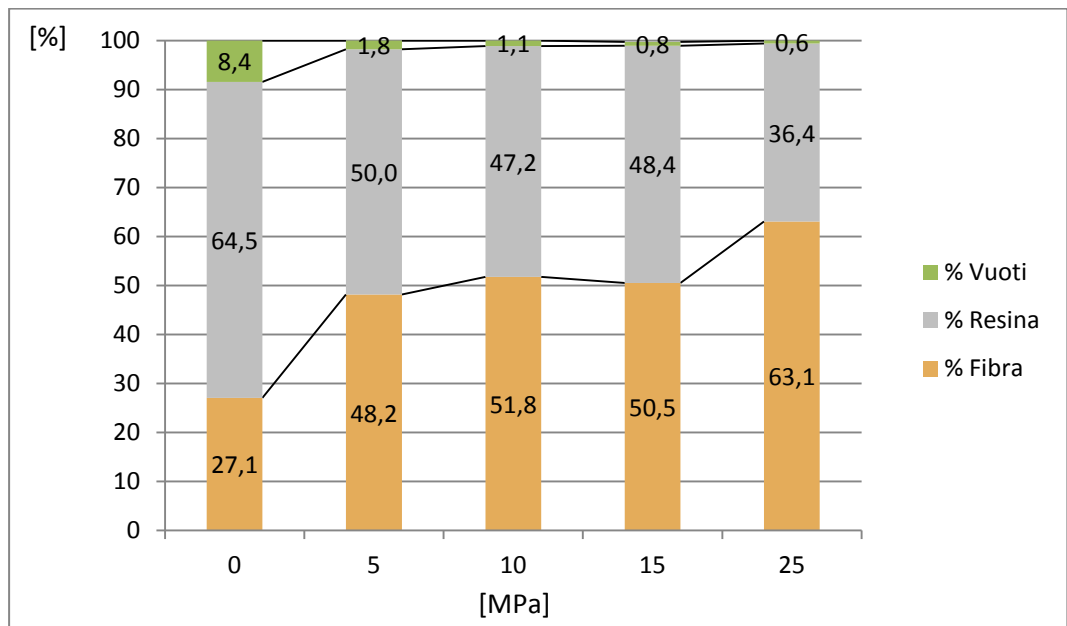



***Fig. 4.89*** *Composizione per frazione volumetrica dei laminati in Biotex orientati prodotti in Bag Molding-Hot Press Curing*

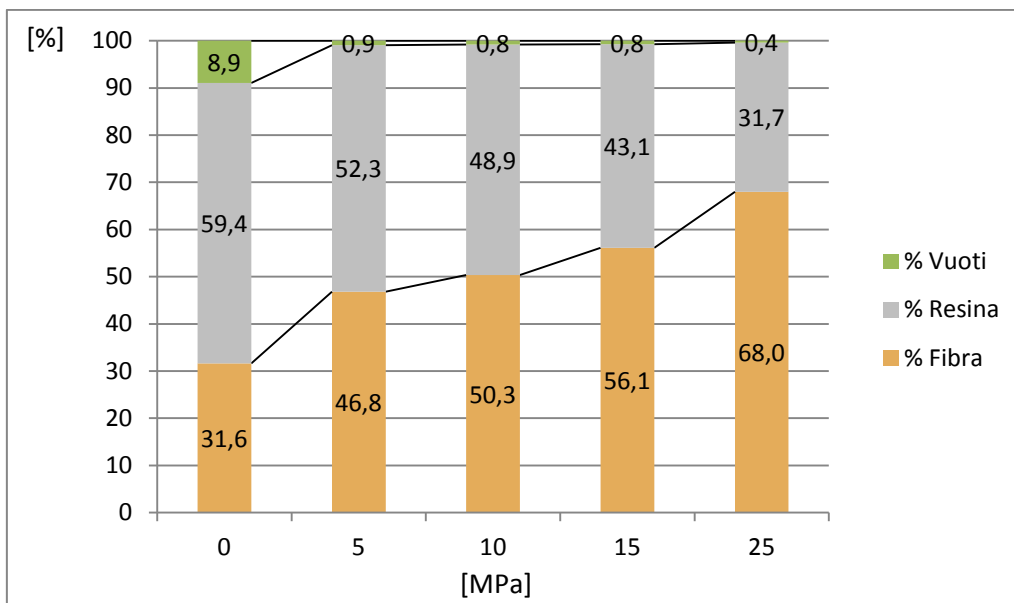



***Fig. 4.90*** *Composizione per frazione volumetrica dei laminati in Biotex a disposizione random nel laminato prodotti in Bag Molding-Hot Press Curing*

Dai grafici precedenti è banale notare l'elevata percentuale in volume di vuoti nei compositi reticolati in pressa ad una pressione nulla (0 MPa), segno evidente che è presente tra le fibre, ma anche all'interno della formulazione iniettata, una notevole quantità di aria che può essere eliminata attuando una pressione di compattazione e simultaneamente sottoponendo il composito ad una pressione relativa negativa.

E' da notare il differente andamento della percentuale dei vuoti nei compositi rinforzati con B607 e B6240C in RTM e Bag Molding-Hot Press Curing. Infatti, mentre nei laminati in B607 la percentuale dei vuoti cresce col crescere della percentuale del rinforzo, nel caso dei laminati in Bag Molding il trend è esattamente l'opposto. Questo è sicuramente dovuto ai livelli elevati di compattazione raggiunti in pressa che, sopratutto nel caso dei 25 MPa, sono paragonabili alla pressione di compattazione esercitata per ricavare i cilindri di fibra per la prova di densità, in cui si è cercato di ridurre al minimo il volume del lumen.

### 4.5.5 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI LAMINATI IN COMPOSITO E CONFRONTO CON I MODELLI PREVISIONALI

I compositi realizzati con i due processi produttivi sono stati testati sia a trazione che a flessione a tre punti per conoscere le grandezze ingegneristiche indispensabili per poter effettuare un confronto ed eventualmente utilizzare i dati ai fini progettuali.

Per ciascun tipo di laminato sono stati testati a trazione cinque provini, in accordo con la norma UNI EN ISO 527, alla velocità di deformazione costante pari a 2 mm/min, partendo da un precarico di 5 N.

A titolo esemplificativo si riportano di seguito, i diagrammi sforzo-deformazione ottenuti dalla prova meccanica a trazione sui compositi, realizzati con il processo produttivo del resin transfer molding (RTM), rinforzati con i tessuti mat, B607 e B6240C non trattati chimicamente.

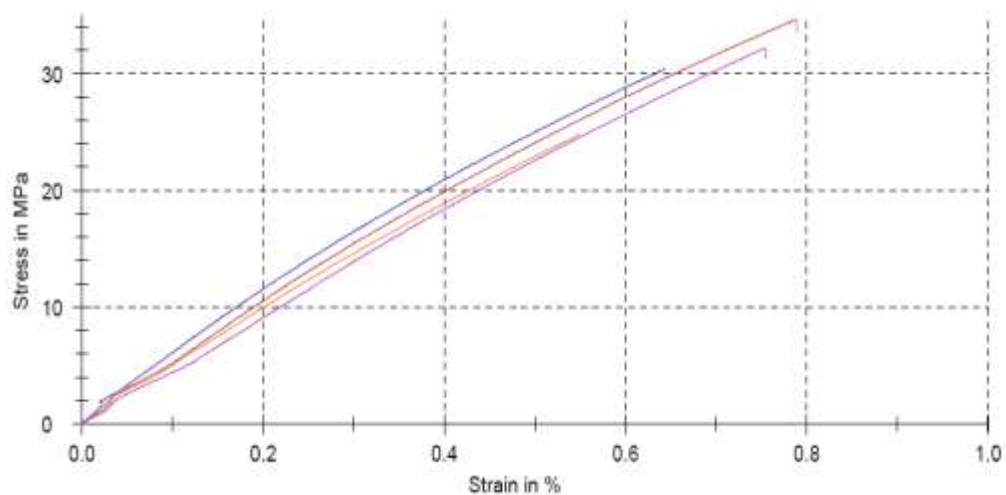



***Fig. 4.91*** *Diagramma sforzo di trazione-deformazione per il composito rinforzato con tessuto Mat ($v_f$=14,1%) prodotto in RTM*

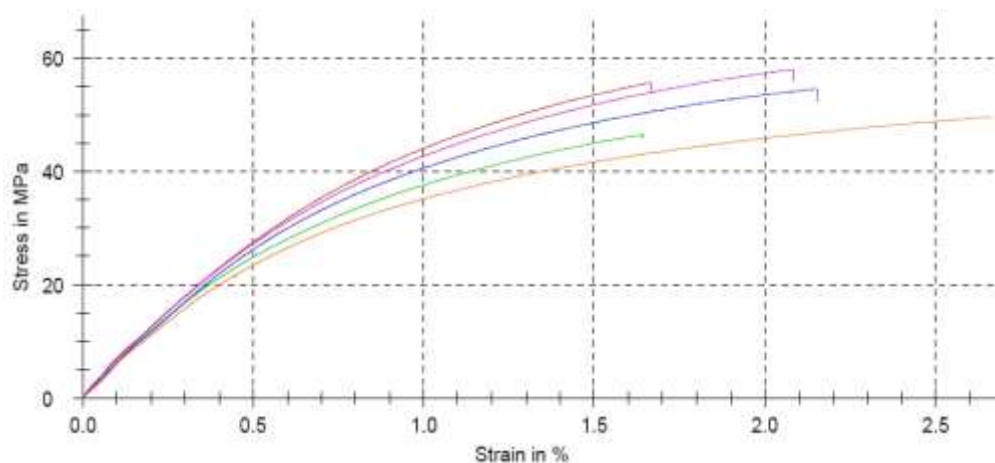



***Fig. 4.92*** *Diagramma sforzo di trazione-deformazione per il composito rinforzato con tessuto B607 ($v_f$=32,0%) prodotto in RTM*

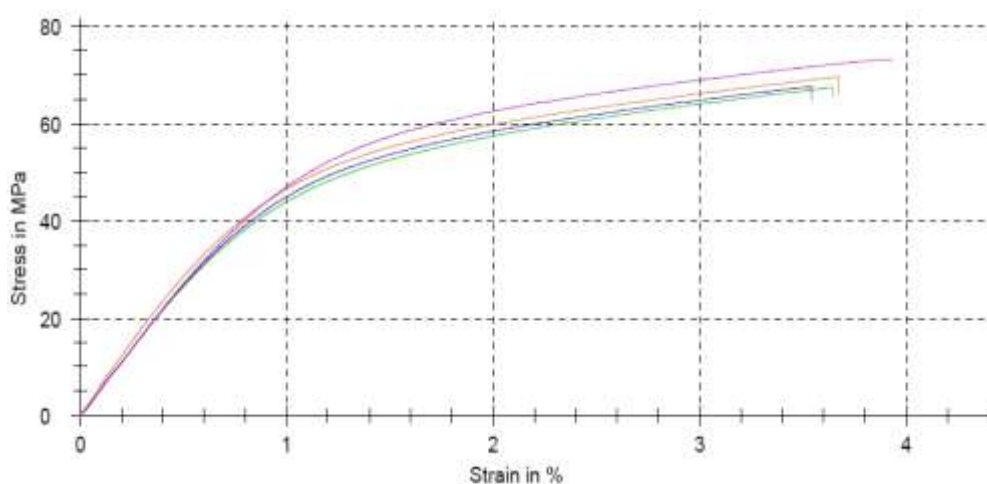



***Fig. 4.93*** *Diagramma sforzo di trazione-deformazione per il composito rinforzato con tessuto B6240C ($v_f$=31,0%) prodotto in RTM*

Nella seguente tabella si riportano, invece, tutti i dati ottenuti dalle prove di trazione, nonché le statistiche associate ad esse, eseguite sui compositi realizzati con il processo produttivo del resin transfer molding (RTM) e rinforzati con tessuti, trattati e non, di B607 e B6240C. Per confronto si riportano anche i risultati della prova a tarzione sui laminati rinforzati con tessuti di mat, anch'essi realizzati mediante il processo del RTM.

Il modulo elastico è stato ottenuto per mezzo di una regressione lineare del primo tratto del diagramma che evidenzia un comportamento elastico.

A seguire si riportano gli istogrammi ricavati mettendo a confronto per tipologia di tessuto e tipologia di trattamento, i risultati inerenti il modulo elastico, la resistenza a trazione e l'allungamento massimo di tutte le prove eseguite sui laminati di composito fibro-rinforzato realizzati con il processo del RTM.

*Tab. 4.12 Proprietà meccaniche a trazione dei laminati prodotti in RTM*

| | Iniez. | % rinforzo $V_p$ | % vuoti $V_v$ | Modulo Elastico E (media) [GPa] | Scarto quadr. medio S [GPa] | Resistenza a trazione σ max (media) [MPa] | Scarto quadr. medio S [MPa] | Allungam. massimo $\varepsilon_{max}$ (media) % | Scarto quadr. medio S % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Mat** | 1 | 14,1 | 0,7 | 3,04 | 0,13 | 30,50 | 4,18 | 0,7 | 0,1 |
| | 2 | 25,8 | 0,7 | 3,59 | 0,48 | 51,84 | 2,10 | 1,4 | 0,2 |
| **B607** | 1 | 32,0 | 1,4 | 5,57 | 0,24 | 52,90 | 4,73 | 2,0 | 0,4 |
| | 2 | 39,0 | 1,7 | 6,41 | 0,52 | 58,91 | 1,89 | 2,1 | 0,2 |
| | 3 | 43,7 | 1,7 | 8,53 | 0,86 | 82,15 | 7,94 | 2,3 | 0,2 |
| **B607 trattate** | 1 | 28,3 | 1,5 | 6,93 | 0,61 | 62,83 | 7,59 | 2,5 | 0,2 |
| | 2 | 30,7 | 1,9 | 8,49 | 0,30 | 86,05 | 4,59 | 2,4 | 0,6 |
| | 3 | 30,7 | 2,1 | 7,29 | 0,48 | 68,34 | 6,65 | 2,3 | 0,3 |
| **B6240C** | 1 | 31,0 | 0,9 | 5,56 | 0,25 | 69,48 | 2,69 | 3,7 | 0,2 |
| | 2 | 38,6 | 1,8 | 6,30 | 0,61 | 63,62 | 4,49 | 4,1 | 0,5 |
| | 3 | 46,3 | 2,6 | 7,06 | 0,67 | 82,46 | 3,17 | 3,8 | 0,8 |
| **B6240C trattate** | 1 | 27,2 | 0,1 | 7,67 | 0,60 | 71,37 | 7,70 | 3,5 | 0,8 |
| | 2 | 29,6 | 0,5 | 5,04 | 0,65 | 58,70 | 1,95 | 3,5 | 0,5 |
| | 3 | 26,8 | 1,9 | 6,79 | 0,30 | 70,05 | 5,69 | 5,1 | 1,2 |

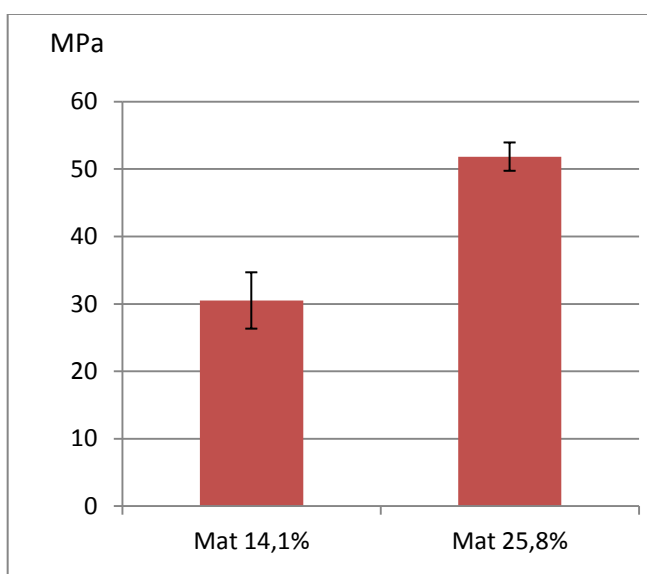



*Fig. 4.94 Andamento della resistenza a trazione al variare della % in volume di tessuto Mat per i compositi realizzati in RTM*

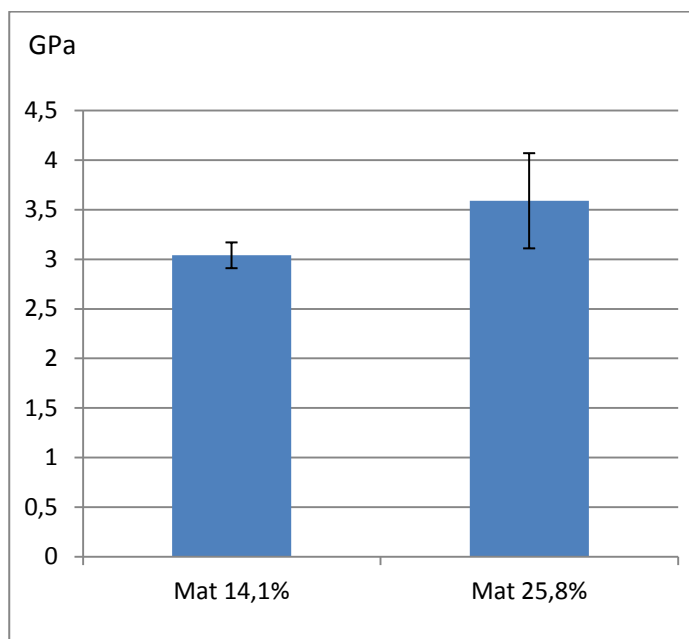



***Fig. 4.95*** *Andamento della modulo elastico a trazione al variare della % in volume di tessuto Mat per i compositi realizzati in RTM*

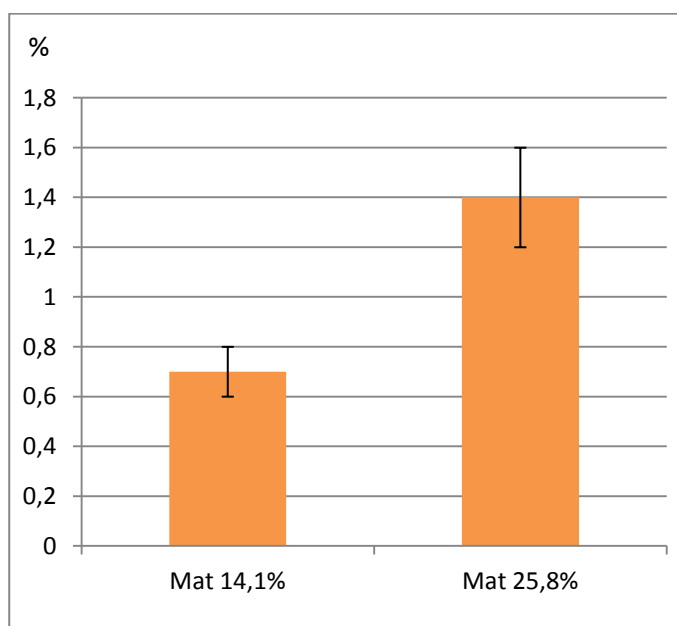



***Fig. 4.96*** *Andamento dell'allungamento massimo a trazione al variare della % in volume di tessuto Mat per i compositi realizzati in RTM*

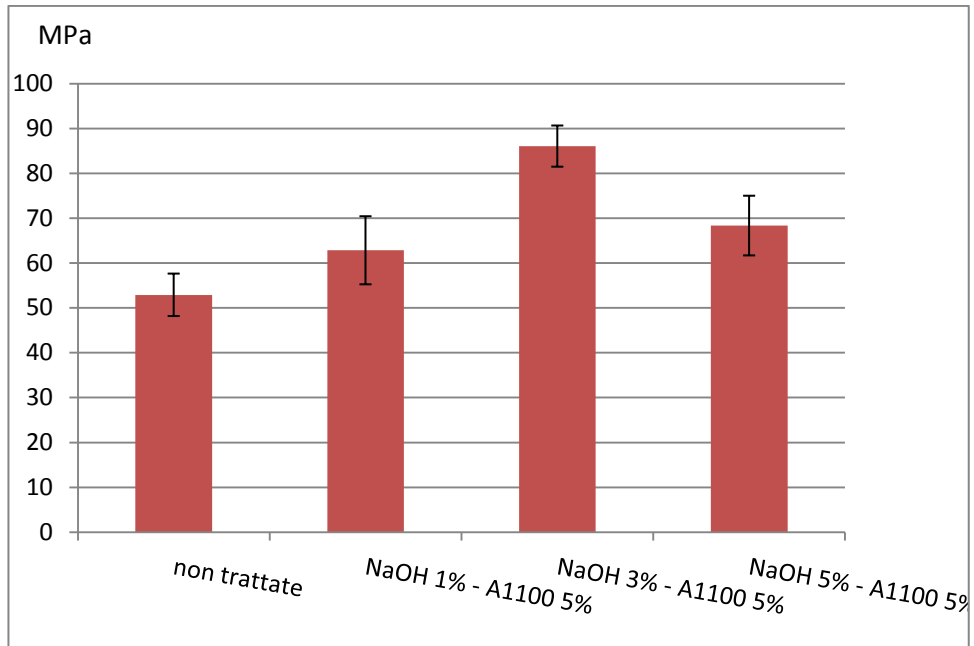



***Fig. 4.97*** *Andamento della resistenza a trazione al variare del trattamento superficiale combinato con NaOH a diverse percentuali e A1100 al 5% per i compositi rinforzati con tessuto B607 realizzati in RTM*

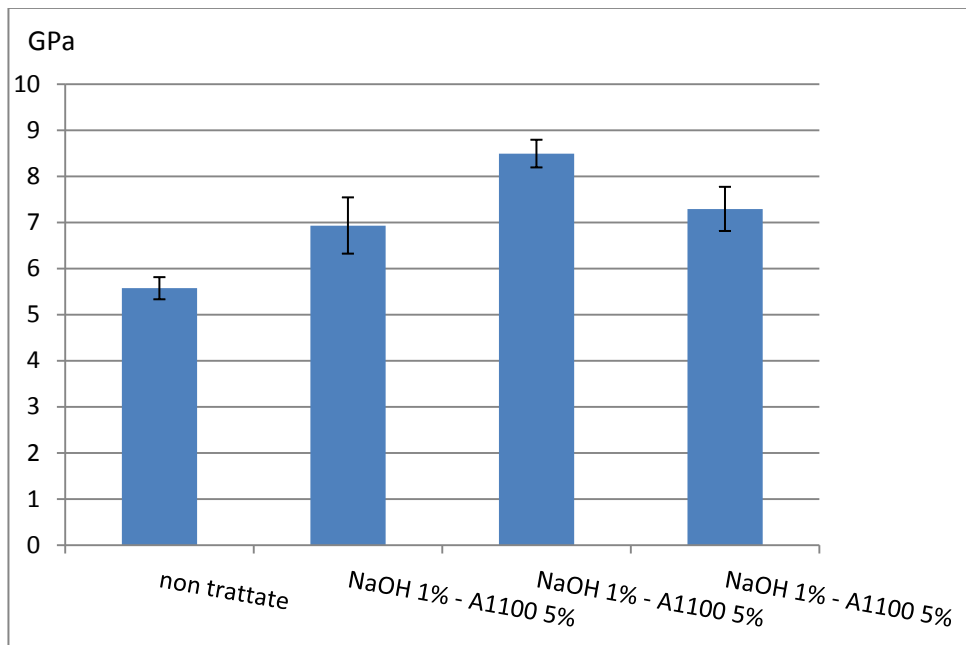



***Fig. 4.98*** *Andamento del modulo elastico a trazione al variare del trattamento superficiale combinato con NaOH a diverse percentuali e A1100 al 5% per i compositi rinforzati con tessuto B607 realizzati in RTM*

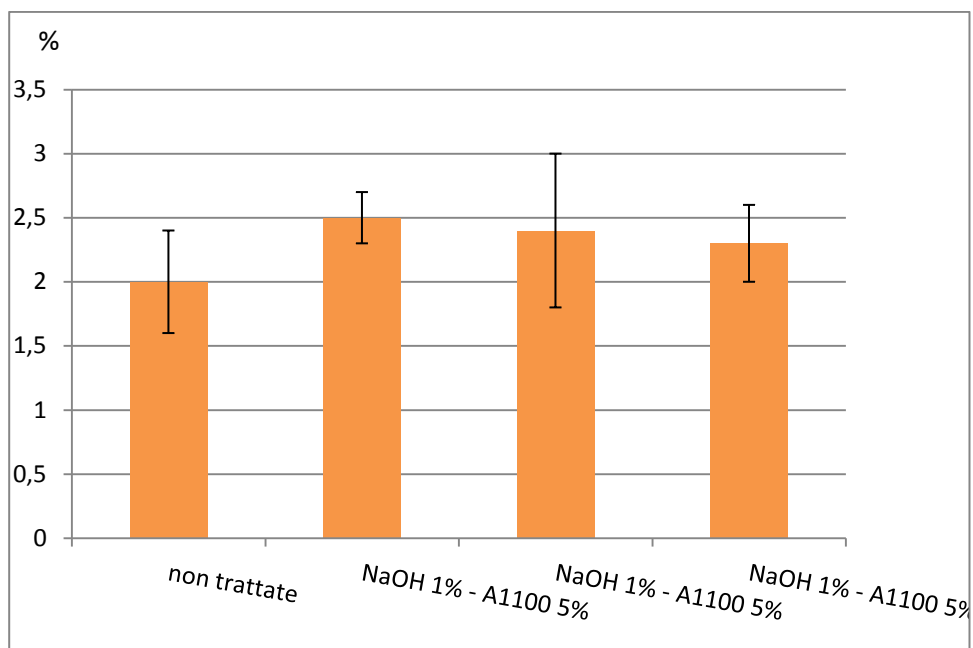



***Fig. 4.99** Andamento della deformazione massima al variare del trattamento superficiale combinato con NaOH a diverse percentuali e A1100 al 5% per i compositi rinforzati con tessuto B607 realizzati in RTM*

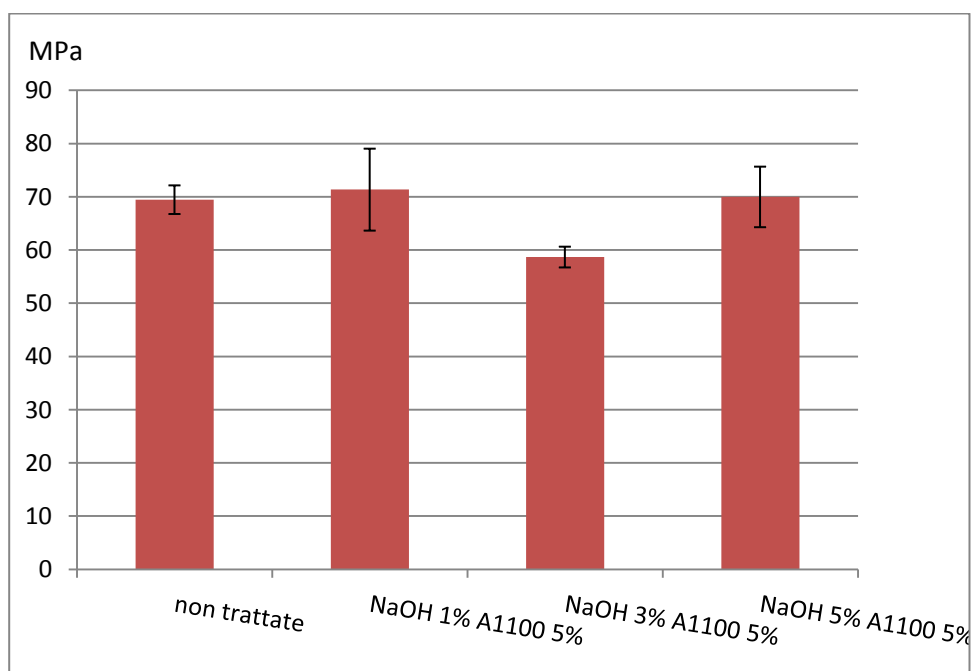



***Fig. 4.100** Andamento della resistenza a trazione al variare del trattamento superficiale combinato con NaOH a diverse percentuali e A1100 al 5% per i compositi rinforzati con tessuto B6240C realizzati in RTM*

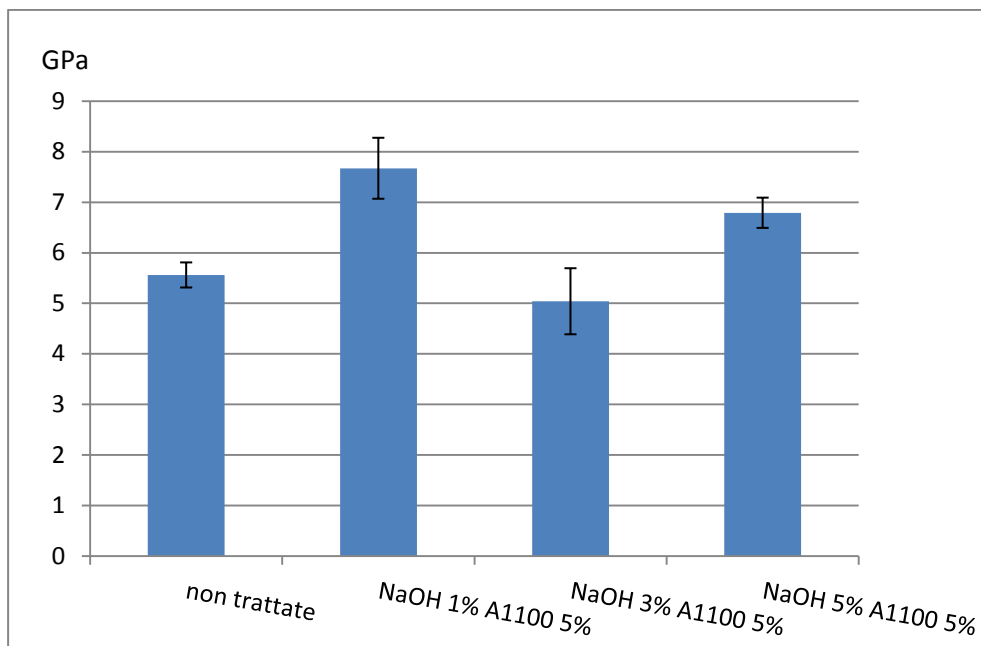



***Fig. 4.101*** *Andamento del modulo elastico a trazione al variare del trattamento superficiale combinato con NaOH a diverse percentuali e A1100 al 5% per i compositi rinforzati con tessuto B607 realizzati in RTM*

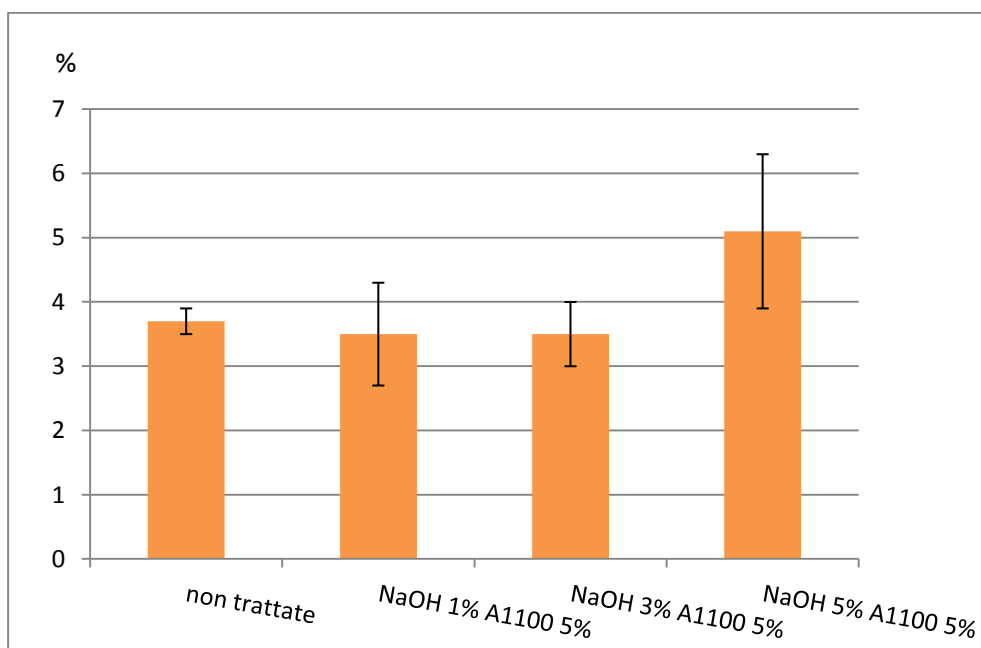



***Fig. 4.102*** *Andamento della deformazione massima al variare del trattamento superficiale combinato con NaOH a diverse percentuali e A1100 al 5% per i compositi rinforzati con tessuto B6240C realizzati in RTM*

Di seguito si riportano le proprietà a flessione ottenute dalle prove dinamo-meccaniche sui laminati prodotti con il processo RTM. Per confronto vengono, inoltre riportati i valori di modulo elastico ottenuti con la prova di trazione.

A titolo esplicativo viene di seguito riportato uno dei diagrammi ottenuti nel corso delle prove. La temperatura di transizione vetrosa $T_g$ è stata assunta in corrispondenza del picco della *tan* $\delta$. E' possibile individuare due temperature di transizione vetrosa, una per frequenza di sollecitazione pari a 1 Hz (curva con primo picco) e 10 Hz (curva con secondo picco).

Nella tabella viene riportata la temperatura di transizione inferiore che è, quindi, ricavata dalla curva a frequenza pari a 1 Hz.

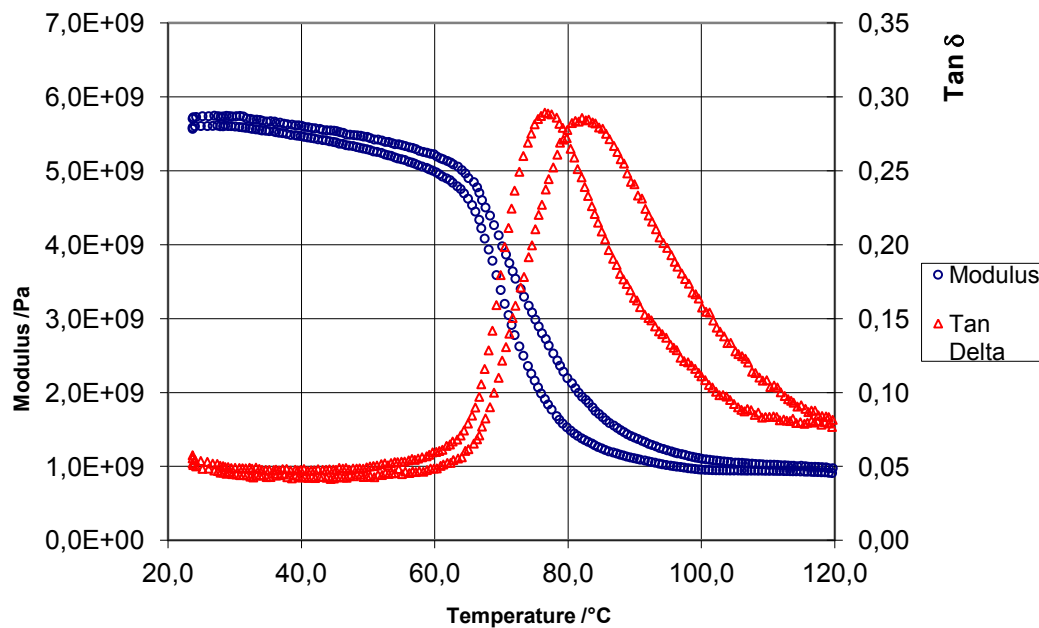



***Fig. 4.103*** *Diagramma relativo all'analisi DMA di una provetta di composito in tessuto B6240C (iniezione n.2) prodotta in RTM*

***Tab. 4.13*** *Proprietà fisiche e meccaniche a trazione e flessione dei laminati prodotti in RTM*

| | Iniez. | % rinforzo $V_p$ | % vuoti $V_v$ | Modulo Elastico a trazione E [GPa] | Modulo Elastico a flessione $E_1$ [GPa] | $T_g$ da tan$\delta$ 1 Hz [°C] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Mat** | 1 | 14,1 | 0,7 | 3,04 | 4,20 | 87,4 |
| | 2 | 25,1 | 0,7 | 3,59 | 3,21 | 87,6 |
| **B607** | 1 | 32,0 | 1,4 | 5,57 | 4,72 | 82,3 |
| | 2 | 39,0 | 1,7 | 6,41 | 4,95 | 83,6 |
| | 3 | 43,7 | 1,7 | 8,53 | 6,54 | 73,8 |
| **B607 trattate** | 1 | 28,3 | 1,5 | 6,93 | 5,75 | 83,6 |
| | 2 | 30,7 | 1,9 | 8,49 | 6,42 | 77,5 |
| | 3 | 30,7 | 2,1 | 7,29 | 5,56 | 82,3 |
| **B6240C** | 1 | 31,0 | 0,9 | 5,56 | 5,32 | 83,5 |
| | 2 | 38,6 | 1,8 | 6,30 | 5,67 | 75,6 |
| | 3 | 46,3 | 2,6 | 7,06 | 6,24 | 79,1 |
| **B6240C trattate** | 1 | 27,2 | 0,1 | 7,67 | 5,34 | 79,5 |
| | 2 | 29,6 | 0,5 | 5,04 | 6,07 | 84,8 |
| | 3 | 26,8 | 1,9 | 6,79 | 5,36 | 78,3 |

Dalla tabella 4.15 si evince come il comportamento a flessione segue in qualche modo il comportamento a trazione dei laminato (ad eccezione del laminato rinforzato con tessuto Mat al 14,1%). Inoltre, come ci si aspettava, il modulo elastico a flessione è inferiore di quello a trazione.

Per quanto concerne la temperatura di transizione vetrosa $T_g$, non si notano apprezzabili variazioni tra le temperature dei singoli laminati ne tra questi e la resina pura.

Analizzando i risultati ottenuti, sia a trazione che a flessione, si osserva che, indipendentemente del tipo di tessuto, l'effetto dell'introduzione delle fibre di canapa, per il tessuto Mat e il B607, e di canapa-cotone, per il tessuto B6240C, comporta, rispetto al comportamento meccanico della sola resina, come d'altronde ci si poteva aspettare, un significativo incremento di alcuni parametri, soprattutto il modulo elastico E e la resistenza a trazione σ.

L'unico laminato che presenta valori di resistenza a trazione inferiori a quelli della sola resina è quello rinforzato con tessuti mat al 14,01 % in volume. L'effetto è da attribuire evidentemente alla disposizione casuale delle fibre nel piano che incrementa la percentuale minima di rinforzo, al di sotto del quale il "rinforzo" in realtà si comporta come un riempitivo. Ad ogni modo c'è da osservare che il modulo elastico presenta comunque un incremento, per cui si può affermare che in tutte le circostanze i tessuti adotatti hanno svolto la funzione di "rinforzo".

Per quanto attiene ai laminati rinforzati con tessuti B607 e B6240C non trattati, l'incremento della percentuale in volume di rinforzo conseguita permette di ottenere un aumento circa di 5 volte il modulo elastico e quasi 3 volte la resistenza a trazione della sola resina impiegata.

Inoltre, i compositi rinforzati con tessuti B607 e B6240C non trattati mostrano proprietà meccaniche nettamente superiori a quelli rinforzati con i tessuti Mat, per cui si può affermare che i tessuti Mat vanno bene se si vuole raggiungere un elevato rapporto proprietà meccaniche/costi, sempre che siano rispettati i limiti di resistenza, modulo elastico e deformazione a rottura connessi all'applicazione.

Per quanto concerne i compositi rinforzati con i tessuti B607 e B6240C pretrattati con percentuale variabile di soda caustica e trattati con amminosilano A1100 al 5% in volume, si osserva in generale un incremento delle proprietà meccaniche, segno evidente che i trattamenti chimici superficiale hanno avuto efficacia in termini di miglioramento delle caratteristiche meccaniche delle singole fibre e di migliore compatibilità tra fibra e matrice. In particolare, i miglioramenti sensibili e maggiori si sono avuti per i compositi del B607, mentre per quelli del B6240C si osserva un sensibile miglioramento solo per il modulo elastico.

Quanto osservato dimostra che non è detto che un trattamento migliorativo applicato ad un tessuto trovi riscontro nel composito in cui il tessuto trattato è impiegato. Infatti, dalle prove meccaniche sui singoli filati si evidenzia un incremento notevole delle proprietà meccaniche che non trova riscontro nelle proprietà meccaniche dei compositi. Tutto ciò trova spiegazione nel fatto che, a differenza dei trattamenti chimici sulle fibre sintetiche, quelli sulle fibre naturali comportano non solo un effetto sull'interfaccia, ma anche una modifica della struttura chimica delle fibre.

In definitiva, si può affermare che bisogna sempre valutare nel composito finale l'effettivo miglioramento generato dai trattamenti superfiali applicati alle fibre e che, stante il modesto incremento di proprietà meccaniche, in relazione al costo dei trattamenti (reagenti e tempo necessario per il trattamento) rispetto a quelli del tessuto, allo stato attuale non conviene adottare i trattamenti studiati ai tessuti in fibra vegetale.

Per tale ragione non sono stati riproposti i trattamenti con soda caustica e amminosilano ai tessuti di rinforzo dei compositi realizzati in Bag Molding di cui se ne discute immediatamente a seguire.

Per quanto riguarda i compositi realizzati in Bag Molding, seguito da reticolazione in pressa a temperatura costante di 50°C per 20 ore, si riportano nella seguente tabella, tutti i dati ottenuti dalle prove di trazione, nonché le statistiche associate ad esse. Il modulo elastico è stato ottenuto per regressione lineare del primo tratto del diagramma di trazione che evidenzia il comportamento elastico.

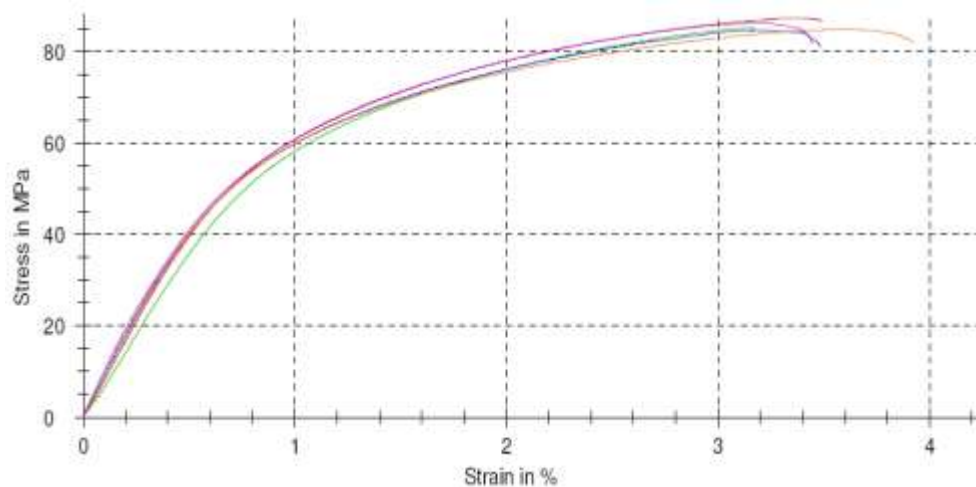



***Fig. 4.104*** *Diagramma sforzo di trazione-deformazione per il composito rinforzato con tessuto Biotex (iniezione n.4) prodotto in Bag Molding*

***Tab. 4.14*** *Proprietà meccaniche a trazione dei laminati prodotti in Bag Molding e reticolati in pressa*

| | Iniez. | % rinforzo $V_p$ | % vuoti $V_v$ | Modulo Elastico E (media) [GPa] | Scarto quadr. medio S [GPa] | Resistenza a trazione σ max (media) [MPa] | Scarto quadr. medio S [MPa] | Allungam. massimo $\varepsilon_{max}$ (media) % | Scarto quadr. medio S % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B607 | 1 | 33,8 | 6,5 | 6,04 | 1,22 | 62,82 | 2,84 | 1,7 | 0,3 |
| | 2 | 48,3 | 0,8 | 9,02 | 0,78 | 99,21 | 1,89 | 2,3 | 0,1 |
| | 3 | 53,0 | 0,4 | 9,93 | 0,82 | 109,97 | 2,78 | 2,5 | 0,1 |
| | 4 | 59,0 | 0,8 | 9,61 | 1,11 | 97,83 | 5,29 | 2,2 | 0,2 |
| | 5 | 68,9 | 0,6 | 10,2 | 1,03 | 85,21 | 0,78 | 2,6 | 0,2 |
| B6240C | 1 | 35,4 | 2,7 | 4,72 | 0,50 | 50,92 | 1,03 | 2,2 | 0,2 |
| | 2 | 46,8 | 0,4 | 6,04 | 0,72 | 71,64 | 5,87 | 3,6 | 0,3 |
| | 3 | 54,1 | 0,2 | 6,51 | 1,46 | 73,93 | 1,81 | 2,2 | 0,1 |
| | 4 | 62,1 | 0,1 | 8,22 | 1,06 | 96,11 | 3,25 | 3,7 | 0,2 |
| | 5 | 72,9 | 0,5 | 9,76 | 1,03 | 96,26 | 1,55 | 3,4 | 0,7 |
| BIOTEX | 1 | 27,1 | 8,4 | 5,04 | 0,34 | 54,22 | 0,61 | 1,9 | 0,1 |
| | 2 | 48,2 | 1,8 | 9,78 | 0,67 | 91,14 | 2,04 | 2,1 | 0,1 |
| | 3 | 51,7 | 1,1 | 8,32 | 1,08 | 85,16 | 2,57 | 3,2 | 0,2 |
| | 4 | 50,5 | 1,0 | 8,49 | 0,83 | 85,64 | 1,14 | 3,3 | 0,2 |
| | 5 | 63,1 | 0,6 | 9,54 | 1,80 | 87,56 | 2,56 | 4,3 | 0,4 |
| BIOTEX random | 1 | 31,6 | 8,9 | 4,91 | 0,61 | 50,81 | 4,08 | 2,0 | 0,3 |
| | 2 | 46,8 | 0,9 | 8,65 | 1,07 | 81,72 | 2,50 | 2,0 | 0,2 |
| | 3 | 51,8 | 0,8 | 8,21 | 0,80 | 78,03 | 2,93 | 2,0 | 0,1 |
| | 4 | 56,1 | 0,8 | 8,48 | 0,73 | 75,34 | 2,68 | 2,3 | 0,3 |
| | 5 | 68,0 | 0,4 | 8,99 | 0,97 | 71,11 | 2,69 | 2,4 | 0,3 |

Di seguito si riportano le proprietà a flessione ottenute dalle prove dinamo-meccaniche sui laminati prodotti con il processo Bag Molding, seguito da reticolazione in pressa a temperatura controllata. Per confronto vengono, inoltre riportati i valori di modulo elastico ottenuti con la prova di trazione. La temperatura di transizione vetrosa $T_g$ è stata assunta in corrispondenza del picco della *tan* $\delta$. Nella tabella viene riportata la temperatura di transizione inferiore che è ricavata dalla curva a frequenza pari a 1 Hz.

***Tab. 4.15*** *Proprietà fisiche e meccaniche a trazione e flessione dei laminati prodotti in Bag Molding*

| | Iniez. | % rinforzo $V_p$ | % vuoti $V_v$ | Modulo Elastico a trazione E [GPa] | Modulo Elastico a flessione $E_1$ [GPa] | $T_g$ da tan$\delta$ 1 Hz [°C] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **B607** | 1 | 33,8 | 6,5 | 6,04 | 4,44 | 78,9 |
| | 2 | 48,3 | 0,8 | 9,02 | 5,91 | 78,4 |
| | 3 | 53,0 | 0,4 | 9,93 | 8,76 | 74,6 |
| | 4 | 59,0 | 0,8 | 9,61 | 6,64 | 86,9 |
| | 5 | 68,9 | 0,6 | 10,2 | 5,39 | 87,8 |
| **B6240C** | 1 | 35,4 | 2,7 | 4,72 | 3,93 | 84,7 |
| | 2 | 46,8 | 0,4 | 6,04 | 4,64 | 77,2 |
| | 3 | 54,1 | 0,2 | 6,51 | 4,14 | 78,3 |
| | 4 | 62,1 | 0,1 | 8,22 | 5,02 | 78,4 |
| | 5 | 72,9 | 0,5 | 9,76 | 6,47 | 83,6 |
| **BIOTEX** | 1 | 27,1 | 8,4 | 5,04 | 3,93 | 85,3 |
| | 2 | 48,2 | 1,8 | 9,78 | 5,95 | 75,9 |
| | 3 | 51,7 | 1,1 | 8,32 | 4,77 | 70,4 |
| | 4 | 50,5 | 1,0 | 8,49 | 6,59 | 76,2 |
| | 5 | 63,1 | 0,6 | 9,54 | 3,88 | 84,1 |
| **BIOTEX RANDOM** | 1 | 31,6 | 8,9 | 4,91 | 3,49 | 87,6 |
| | 2 | 46,8 | 0,9 | 8,65 | 5,39 | 71,6 |
| | 3 | 51,8 | 0,8 | 8,21 | 4,89 | 69,6 |
| | 4 | 56,1 | 0,8 | 8,48 | 5,67 | 77,5 |
| | 5 | 68,0 | 0,4 | 8,99 | 5,89 | 78,3 |

Dalla tabella 4.15 si evince come il comportamento a flessione segue in qualche modo il comportamento a trazione dei laminato. Inoltre, come ci si aspettava, il modulo elastico a flessione è inferiore di quello a trazione.

Per quanto concerne la temperatura di transizione vetrosa $T_g$, non si notano apprezzabili variazioni tra le temperature dei singoli laminati ne tra questi e la resina pura.

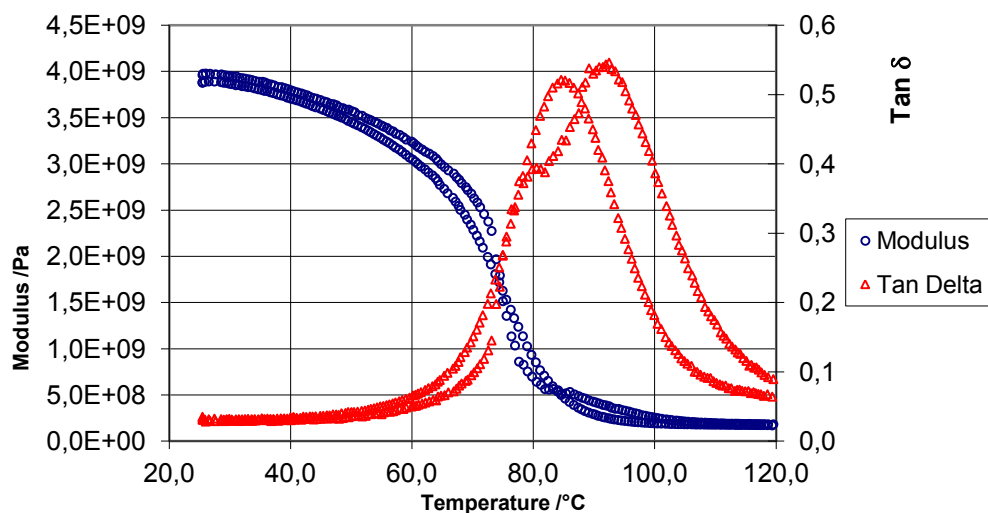



***Fig. 4.105*** *Diagramma relativo all'analisi DMA di una provetta di composito rinforzato con Biotex (iniezione n.1) prodotto in Bag Molding*

Di seguito si riportano le tabelle riepilogative per tipologia di tessuto impiegato nella produzione dei laminati in composito mediante il processo del Bag Molding. Nel caso dei tessuti B607 e B6240C si riportano anche i valori dei parametri meccanici ottenuti per i laminati prodotti con la tecnica del resin transfer molding (RTM), escludendo quelli per i compositi con i tessuti trattati.

Immediatamente dopo la tabella, si riportano gli istogrammi ricavati mettendo a confronto, per tipologia di tessuto, i risultati inerenti il modulo elastico, la resistenza a trazione e l'allungamento massimo di tutte le prove eseguite sui laminati di composito fibro-rinforzato realizzati con il processo del Bag Molding e per confronto quelli con il RTM ad eccezione dei laminati con i tessuti trattati.

*__Tab. 4.16__ Proprietà fisiche e meccaniche a trazione e flessione dei laminati prodotti in RTM e Bag Molding con tessuti B607*

| | Iniez. | % rinforzo $V_p$ | % vuoti $V_v$ | Modulo Elastico a trazione E [GPa] | Modulo Elastico a flessione $E_1$ [GPa] | $T_g$ da tan$\delta$ 1 Hz [°C] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **RTM** | 1 | 32,0 | 1,4 | 5,57 | 4,72 | 82,3 |
| | 2 | 39,0 | 1,7 | 6,41 | 4,95 | 83,6 |
| | 3 | 43,7 | 1,7 | 8,53 | 6,54 | 73,8 |
| **BAG Molding** | 1 | 33,8 | 6,5 | 6,04 | 4,44 | 78,9 |
| | 2 | 48,3 | 0,8 | 9,02 | 5,91 | 78,4 |
| | 3 | 53,0 | 0,4 | 9,93 | 8,76 | 74,6 |
| | 4 | 59,0 | 0,8 | 9,61 | 6,64 | 86,9 |
| | 5 | 68,9 | 0,6 | 10,2 | 5,39 | 87,8 |

***Fig. 4.106** Resistenza a trazione di tutti i laminati rinforzati con B607 non trattato prodotti in RTM e Bag Molding*

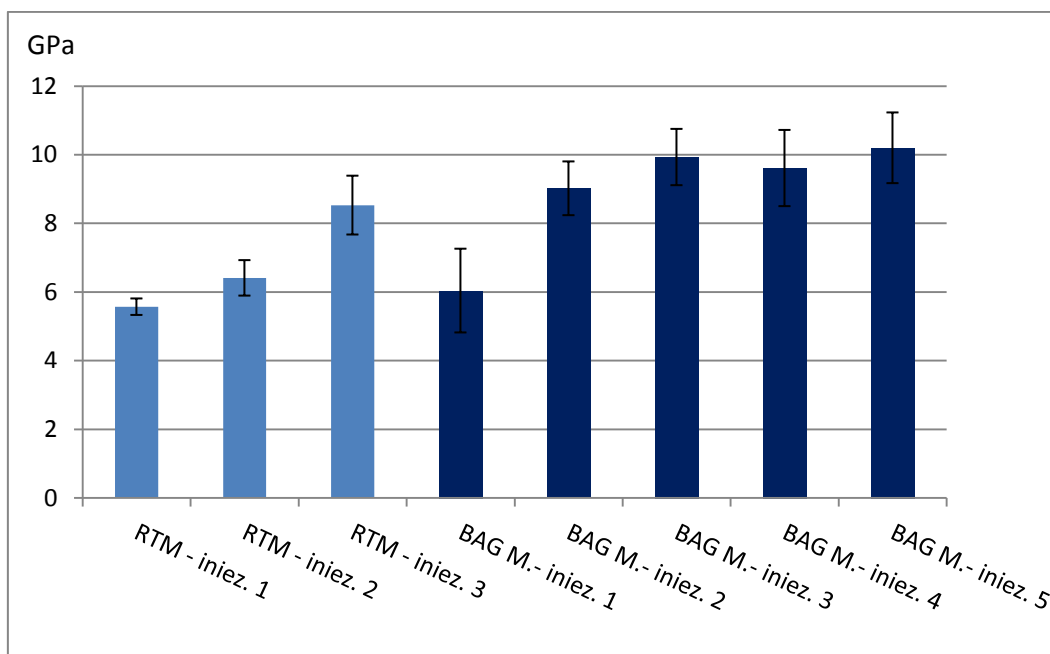



***Fig. 4.107*** *Modulo elastico a trazione di tutti i laminati rinforzati con B607 non trattato prodotti in RTM e Bag Molding*

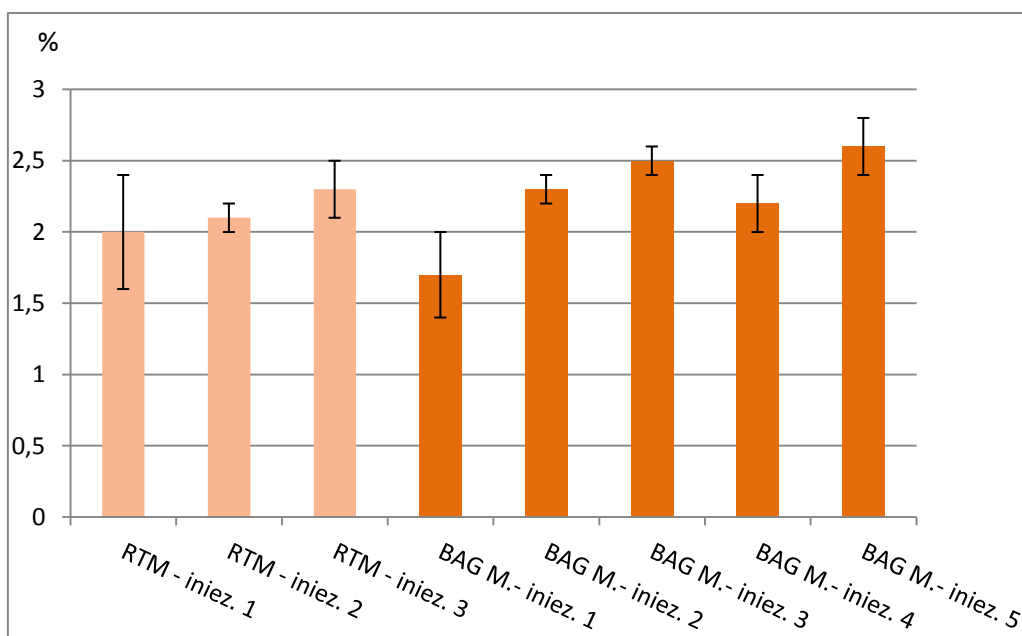



***Fig. 4.108*** *Deformazione a rottura di tutti i laminati rinforzati con B607 non trattato prodotti in RTM e Bag Molding*

***Tab. 4.17*** *Proprietà fisiche e meccaniche a trazione e flessione dei laminati prodotti in RTM e Bag Molding con tessuti B6240C*

| | Iniez. | % rinforzo $V_p$ | % vuoti $V_v$ | Modulo Elastico a trazione E [GPa] | Modulo Elastico a flessione $E_1$ [GPa] | $T_g$ da tan$\delta$ 1 Hz [°C] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **RTM** | 1 | 31,0 | 0,9 | 5,56 | 5,32 | 83,5 |
| | 2 | 38,6 | 1,8 | 6,30 | 5,67 | 75,6 |
| | 3 | 46,3 | 2,6 | 7,06 | 6,24 | 79,1 |
| **BAG Molding** | 1 | 35,4 | 2,7 | 4,72 | 3,93 | 84,7 |
| | 2 | 46,8 | 0,4 | 6,04 | 4,64 | 77,2 |
| | 3 | 54,1 | 0,2 | 6,51 | 4,14 | 78,3 |
| | 4 | 62,1 | 0,1 | 8,22 | 5,02 | 78,4 |
| | 5 | 72,9 | 0,5 | 9,76 | 6,47 | 83,6 |

***Fig. 4.109*** *Resistenza a trazione di tutti i laminati rinforzati con B6240C non trattato prodotti in RTM e Bag Molding*

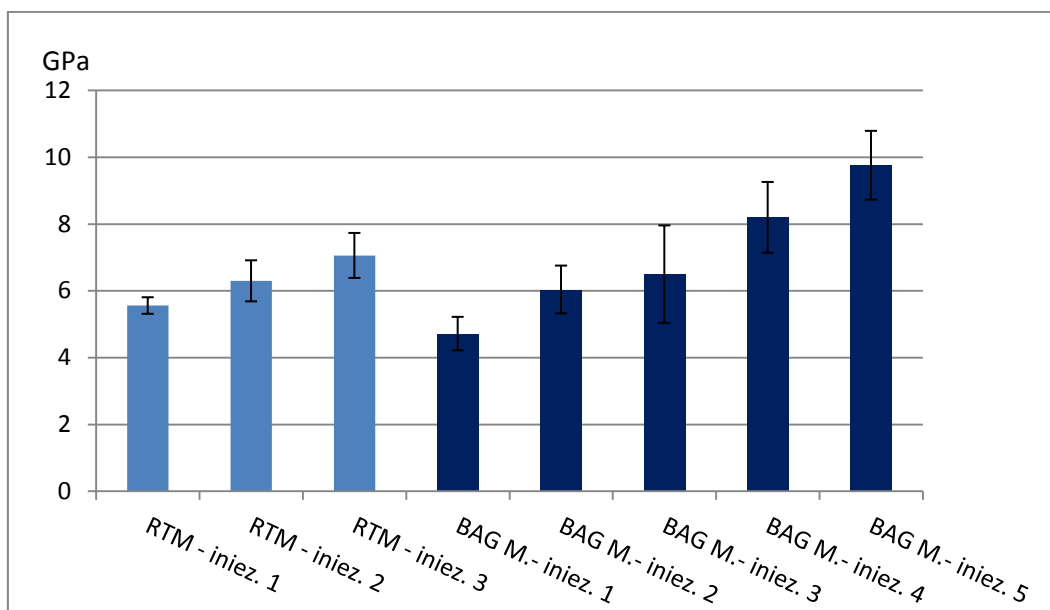



***Fig. 4.110*** *Modulo elastico a trazione di tutti i laminati rinforzati con B6240C non trattato prodotti in RTM e Bag Molding*

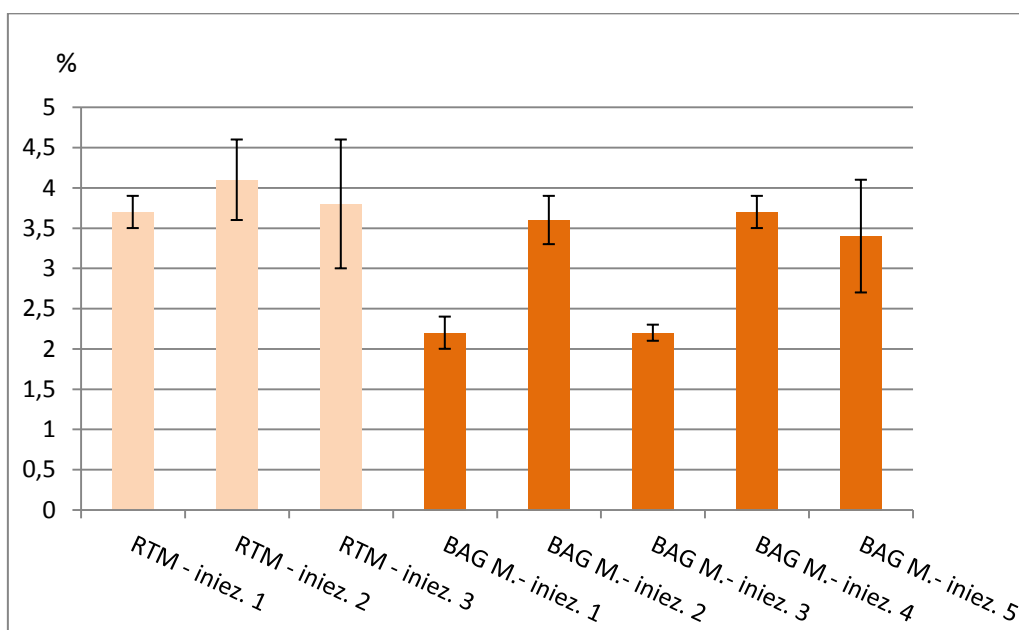



***Fig. 4.111*** *Deformazione a rottura di tutti i laminati rinforzati con B6240C non trattato prodotti in RTM e Bag Molding*

*Tab. 4.18* *Proprietà fisiche e meccaniche a trazione e flessione dei laminati prodotti in RTM e Bag Molding con tessuti Biotex*

| | Iniez. | % rinforzo $V_p$ | % vuoti $V_v$ | Modulo Elastico a trazione E [GPa] | Modulo Elastico a flessione $E_1$ [GPa] | $T_g$ da tan$\delta$ 1 Hz [°C] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| BIOTEX | 1 | 27,1 | 8,4 | 5,04 | 3,93 | 85,3 |
| | 2 | 48,2 | 1,8 | 9,78 | 5,95 | 75,9 |
| | 3 | 51,7 | 1,1 | 8,32 | 4,77 | 70,4 |
| | 4 | 50,5 | 1,0 | 8,49 | 6,59 | 76,2 |
| | 5 | 63,1 | 0,6 | 9,54 | 3,88 | 84,1 |
| BIOTEX RANDOM | 1 | 31,6 | 8,9 | 4,91 | 3,49 | 87,6 |
| | 2 | 46,8 | 0,9 | 8,65 | 5,39 | 71,6 |
| | 3 | 51,8 | 0,8 | 8,21 | 4,89 | 69,6 |
| | 4 | 56,1 | 0,8 | 8,48 | 5,67 | 77,5 |
| | 5 | 68,0 | 0,4 | 8,99 | 5,89 | 78,3 |

***Fig. 4.112*** *Resistenza a trazione di tutti i laminati rinforzati con Biotex prodotti in Bag Molding*

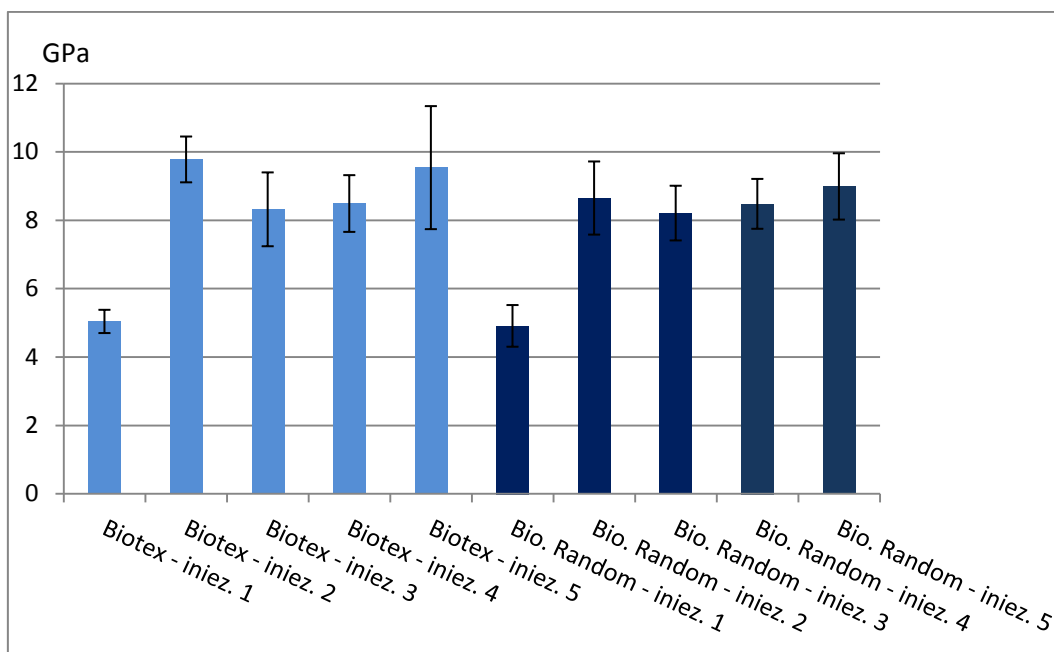



***Fig. 4.113*** *Modulo elastico a trazione di tutti i laminati rinforzati con Biotex prodotti in Bag Molding*

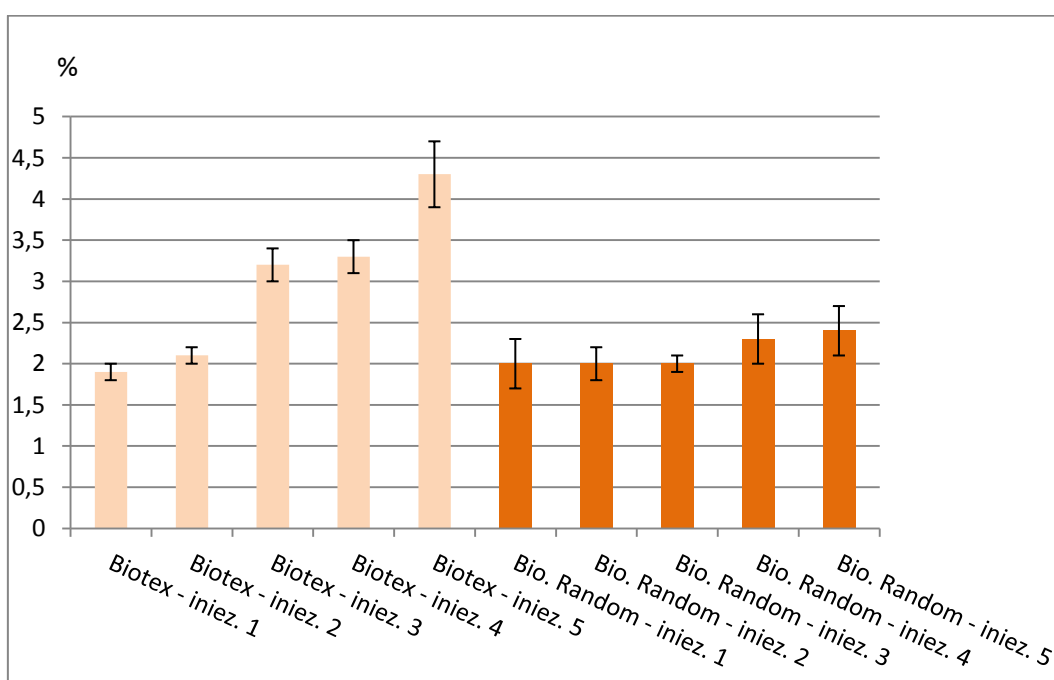



***Fig. 4.114*** *Deformazione a rottura di tutti i laminati rinforzati con Biotex prodotti in Bag Molding*

Dall'analisi dei grafici mostrati sopra si evince che aumentando la pressione di compattazione si aumenta la frazione volumetrica di fibra

presente nel laminato e quindi, si ottengono proprietà meccaniche migliori. Tuttavia, i dati mostrano una sorta di livellamento per alte frazioni volumetriche che è dovuto alla maggiore incidenza della porosità intrinseca delle fibre. Tale porosità, dovuta al lumen delle fibre, aumenta nei laminati prodotti in RTM all'aumentare della percentuale in volume di fibra, mentre decresce nei lamnitai prodotti in Bag Molding-Hot Press Curing all'aumentare della pressione di compattazione in pressa, quindi della percentuale in volume di rinforzo.

Il livellamento delle proprietà ad alte frazioni volumetriche è determinato anche dalla difficoltà che la resina incontra nel bagnare uniformemente tutto il composito, quindi viene sempre meno il trasferimento dei carichi dalla matrice alle fibre con il conseguente scorrimento reciproco delle fibre del filato. Tutto ciò porta ovviamente ad un abbassamento delle proprietà ottenibili.

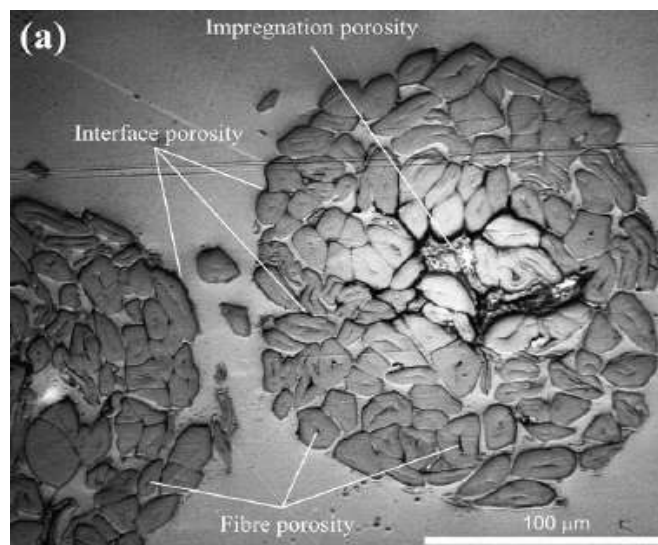



***Fig. 4.115*** *Scansione al SEM della superficie di rottura di un composito a matrice termoplastica rinforzata con fibre vegetali in cui si nota la presenza della porosità legata al lumen delle fibre e la difficoltà per la resina di impregnare le fibre*

***Fig. 4.116*** *Scansione al microscopio ottico di due sezioni di laminati rinforzati rispettivamente con Biotex e B6240C in cui si vede la presenza di macrovuoti*

Per quanto concerne i laminati rinforzati con i tessuti Biotex, confrontando i dati al variare della orientazione dei tessuti sovrapposti si nota come non ci siano una grossa differenza di proprietà meccaniche, per cui si può ritenere che, sebbene il tessuto presenta in direzione warp due multifilamento in più rispetto alla direzione weft, non esiste una reale direzione preferenziale di rinforzo.

In generale, operando un confronto tra i laminati prodotti, si può affermare che le fibre non ritorte (twistless) Biotex, sebbene commercializzate come un prodotto in grado di migliorare fino al 50% lle proprietà meccaniche dei laminati rinforzati con altre fibre ritorte, in realtà non determinano tale sensibile miglioramento, nemmeno alle alte pressioni di compattazione. Tutt'al più già a "basse" pressioni di compattazione permettono di raggiungere le massime proprietà meccaniche per effetto della maggiore facilità di compattazione (da notare che la variazione della percentuale in volume di rinforzo subisce un lieve incremento all'aumentare della pressione di compattazione).

I campioni prodotti con le tecniche sopra citate sono stati analizzati anche per via microscopica facendo ricorso a diversi strumenti a gradi di risoluzione diverse. In particolare si sono utilizzati sia un microscopio ottico che un microscopio a scansione elettronica.

Le immagini ottenute al microscopio ottico sono mostrate sotto e mettono in evidenza le superfici di frattura dei campioni testati a trazione e dei dettagli dei vuoti presenti nel campione.

Le immagini mostrano chiaramente che, per i compositi rinforzati con i tessuti, la frattura nella resina procede in modo fragile mentre le fibre

subiscono uno scorrimento dei filamenti con rottura progressiva. Le analisi SEM hanno confermano le osservazioni effettuate con le analisi al microscopio ottico, mostrando, inoltre, che le fibre utilizzate non hanno un'adesione ottimale alla matrice. A supporto di questa osservazioni nelle seguenti figure è anche mostrato uno yarn che ha subito il fenomeno del pull-out.

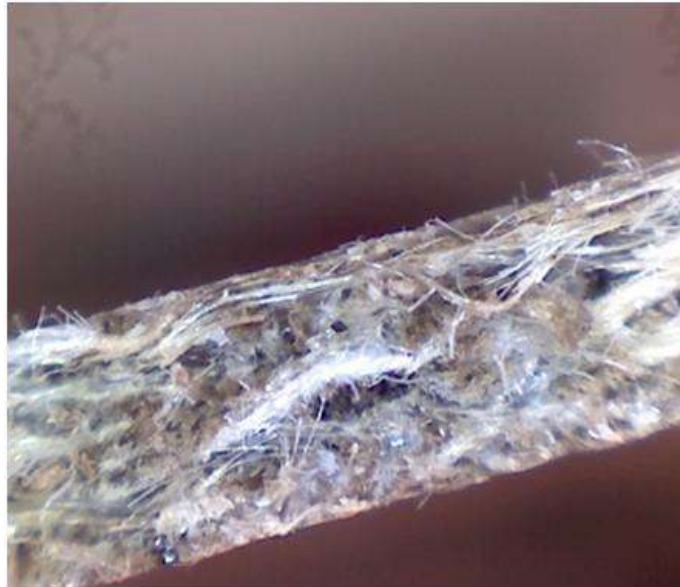



***Fig. 4.117*** *Scansione al microscopio ottico (100x) della superficie di frattura di un provino di laminato rinfrozato con tessuto Biotex (iniezione n.2) testato a trazione che ha subito una rottura netta*

***Fig. 4.118*** *Rottura non netta di un provino di composito rinforzato con tessuto Biotex testato a trazione*

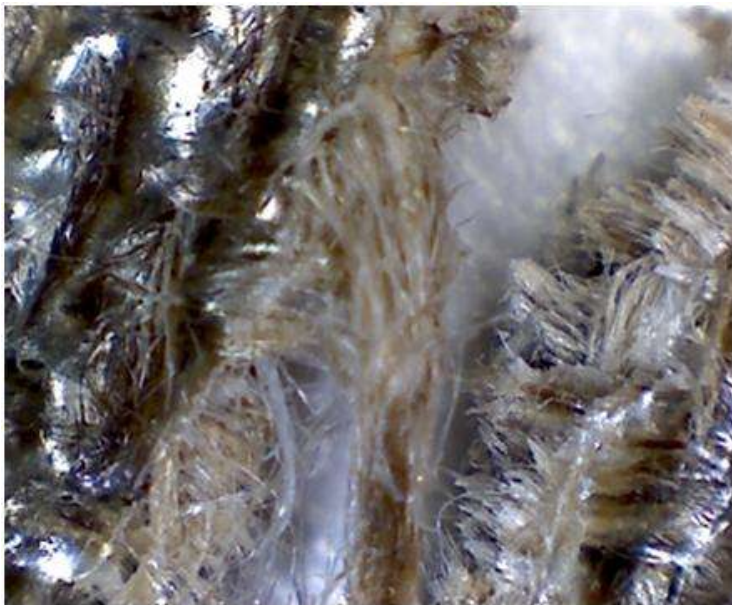



***Fig. 4.119*** *Ingrandimendo della zona di frattura del provino di fig.4.117: particolare del fenomeno di pull-out dello yarn di fibra Biotex*

***Fig. 4.120*** *Scansione al SEM della superficie di frattura di un provino di composito rinforzato con tessuto B607 testato a trazione: particolare del fenomeno di pull-out dello yarn*

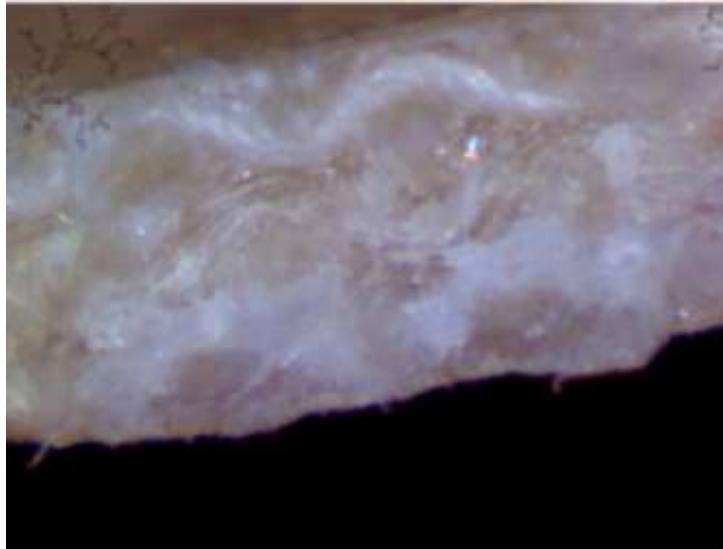



***Fig. 4.121*** *Scansione al microscopio ottico (200x) della superficie di frattura di un provino di laminato rinfrozato con tessuto B6240C (iniezione n.2) testato a trazione che ha subito una rottura netta*

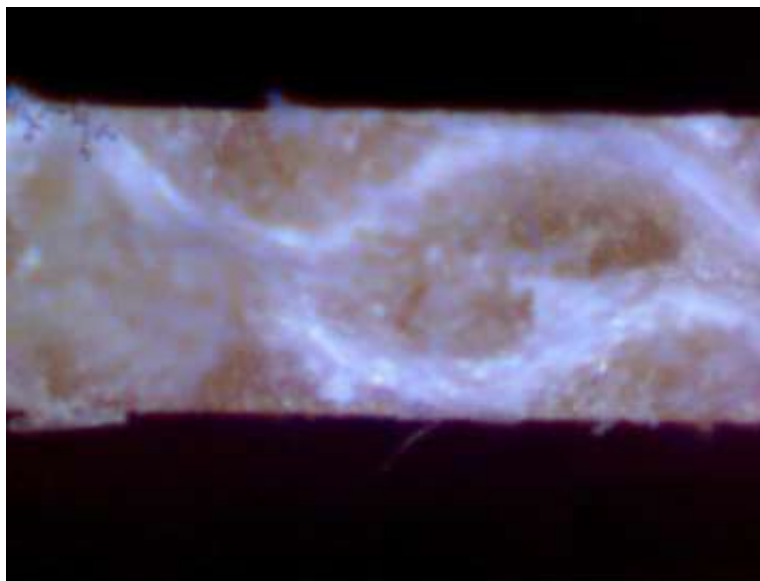



***Fig. 4.122*** *Scansione al microscopio ottico (200x) della superficie di frattura di un provino di laminato rinfrozato con tessuto B607 (iniezione n.3) testato a trazione che ha subito una rottura netta*

Le proprietà fisiche, soprattutto in termini di percentuale in volume dei costituenti e dei vuoti, dei laminati rinforzati con i tessuti non trattati superficialmente e prodotti con i due processi produttivi, sono state impiegate per validare la funzionalità dei due modelli di previsione

micromeccanici selezionati: il modello di Cox-Krenchel e il modello di Madsen. Per la formulazione completa dei modelli si rimanda al capitolo 3.

Modello di Cox-Krenchel

$$E = \eta_{oE}\eta_{lE}E_f v_f + (1 - v_f)E_m \quad (29)$$

$$\sigma_{uc} = \eta_s \sigma_{uf} v_f + (1 - v_f)\sigma_m \quad (35)$$

Modello di Madsen

$$E_c = \left(\eta_o \eta_l v_f E_f + V_m E_m\right)(1 - v_p)^n \quad (40)$$

$$\sigma_{uc} = (\eta_s v_f \sigma_{uf} + v_m \sigma_m)(1 - v_p)^n \quad (41)$$

Il fattore $\eta_{lE}$ di efficienza di lunghezza delle fibre è stato posto circa uguale a 1 a causa della lunghezza delle fibre del mat e delle fibre dei filati.

Il fattore $\eta_{oE}$ di orientazione delle fibre è stato posto pari a 3/8 nel caso del mat, mentre uguale a 1/2 nel caso dei tessuti ad orientazione bidirezionale.

Data l'impossibilità di testare singole fibre estratte dai filati yarn, a causa del diametro troppo piccolo, si è proceduto nell'utilizzo dei modellli di previsione adottando come proprietà meccaniche delle fibre quelle ricavate dalla letteratura, ad eccezione dei tessuti Mat e B607. Infatti, essendo tali tessuti composti integralmente da canapa si è proceduto adottanto le proprietà meccaniche ottenute per le fibre bundle estratte dal mat, di diametro notevolmente superiori a quelle del filato. Per le proprietà meccaniche del B6240 si è operata una media ponderata tra le proprietà meccaniche della fibra di canapa estratta dal mat e quelle per il cotone ricavate dalla letteratura. Sono state, invece, integralmente mutuate dalla letteratura scientifica le proprietà meccaniche delle fibre di lino del Biotex.

Poiché la matrice ha una deformazione a rottura inferiore rispetto a quella della resina, in questo caso non va calcolata la tensione di rottura della resina in corrispondenza della deformazione massima delle fibra, ma al contrario, la tensione massima delle fibre in corrispondenza della deformazione di rottura della matrice.

Si riportano in tabella i valori usati nei modelli previsionali.

***Tab. 4.19*** *Tabelle delle proprietà meccaniche adottate nei modelli previsionali*

| tessuto | E [GPa] | $\sigma_f$ [MPa] | $\sigma_{f_adottata}$ [MPa] | Fonte |
|---|---|---|---|---|
| **Mat** | 28,0 | 1161,80 | 552,60 | Sperimentale |
| **B607** | 28,0 | 1161,81 | 552,60 | Sperimentale |
| **B624OC** | 16,8 | 987,50 | 332,00 | Sperimetale-letteratura |
| **Biotex** | 34,0 | 900,00 | 300,00 | letteratura |

Di seguito si riportano tutti i diagrammi previsionali, ricavati imponendo una percentuale in volume di vuoti $V_v$=0%, distinti per tipologia di tessuto utilizzato.

Ad eccezione dei laminati rinforzati con il mat, si riporta anche l'andamento delle proprietà meccaniche (linea trattegiata) che si ottiene utilizzando, al posto dei valori riportati in tabella 4.19, i valori delle proprietà meccaniche dei filati ottenuti in precedenza (escluso il Biotex per cui non è stata condotta una campagna di test specifici a trazione sui singoli filamenti).

Il garfico del "dry filament" è stato ottenuto con il modello di Madsen ipotizzando che i vuoti siano proporzionali alla percentuale in volume di rinforzo, secondo un fattore di proporzionalità pari alla media dei rapporti tra la percentuale di vuoti e la percentuale di fibre dei laminati prodotti.

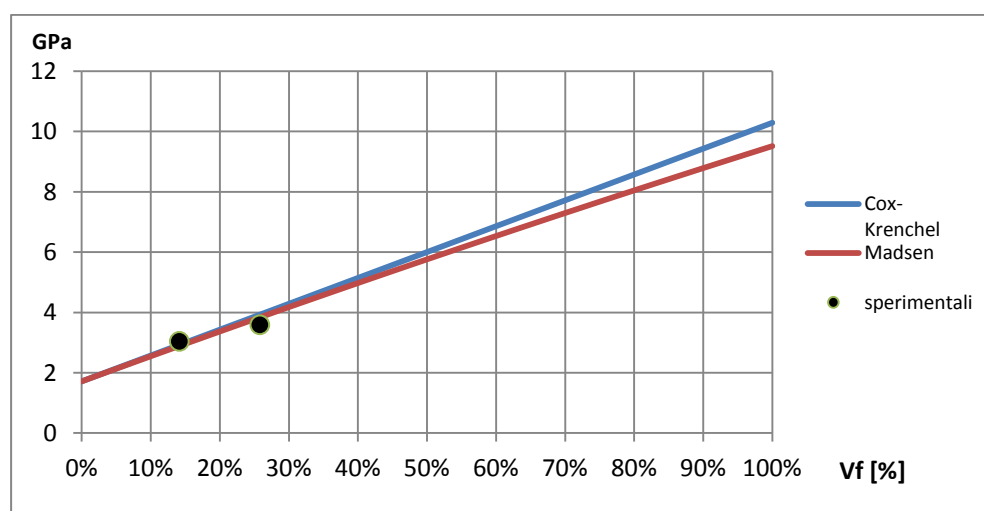



***Fig. 4.123*** *Diagramma del modulo elastico in funzione della percentuale in volume di rinforzo per i laminati rinforzati con tessuto Mat*

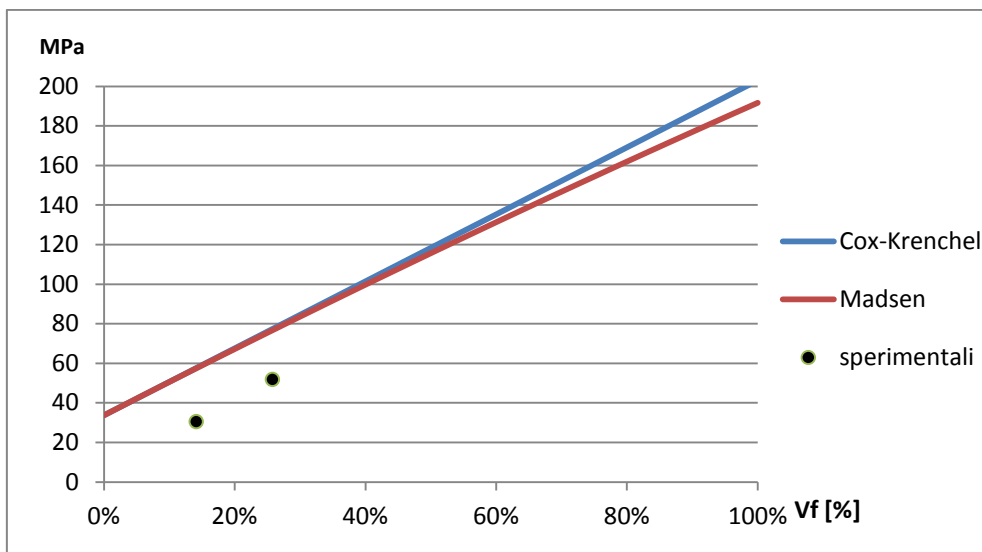



***Fig. 4.124*** *Diagramma della resistenza a trazione in funzione della percentuale in volume di rinforzo per i laminati rinforzati con tessuto Mat*

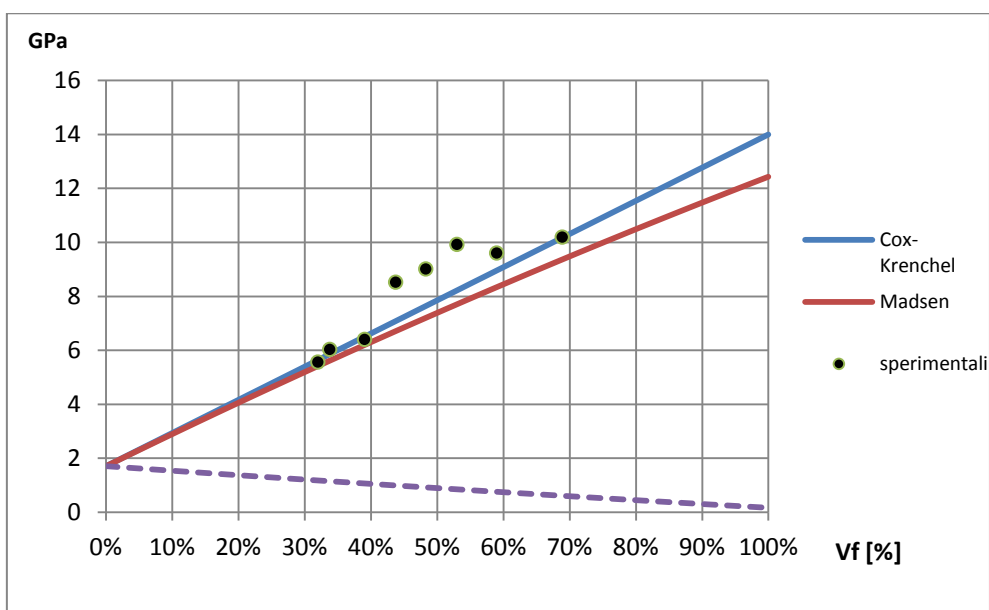



***Fig. 4.125*** *Diagramma del modulo elastico in funzione della percentuale in volume di rinforzo per i laminati rinforzati con tessuto B607*

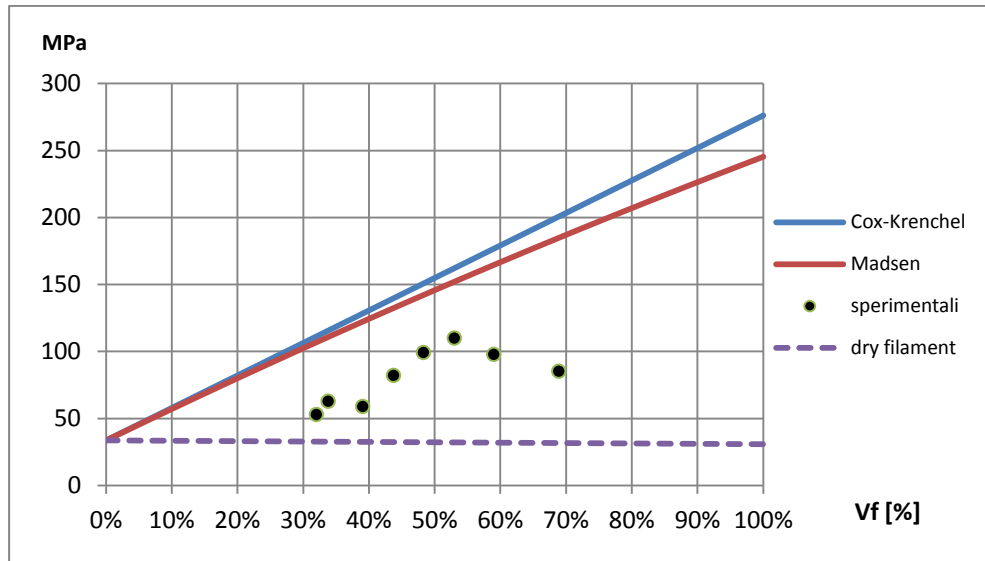



***Fig. 4.126*** *Diagramma della resistenza a trazione in funzione della percentuale in volume di rinforzo per i laminati rinforzati con tessuto B607*

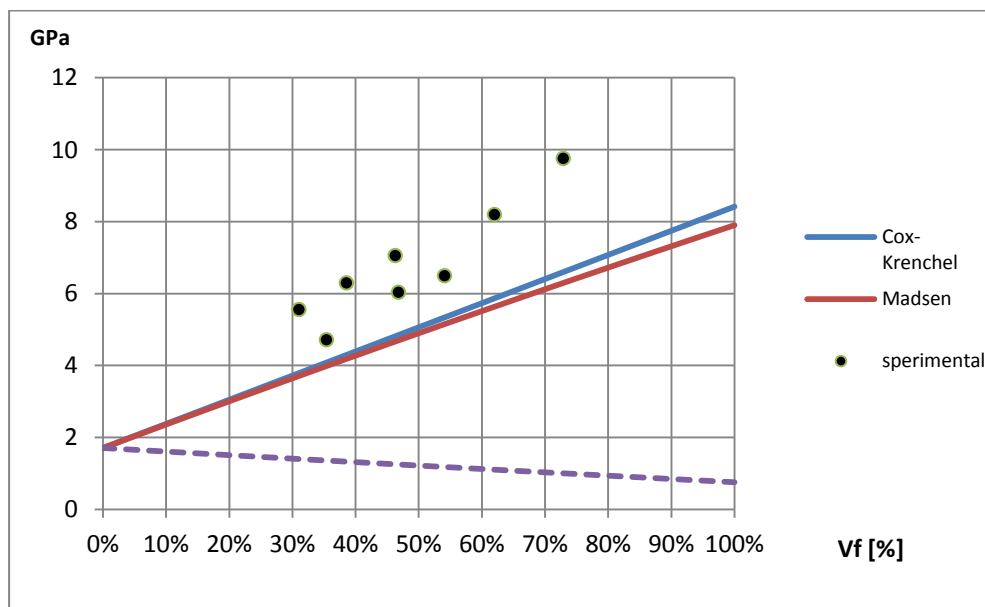



***Fig. 4.127*** *Diagramma del modulo elastico in funzione della percentuale in volume di rinforzo per i laminati rinforzati con tessuto B6240C*

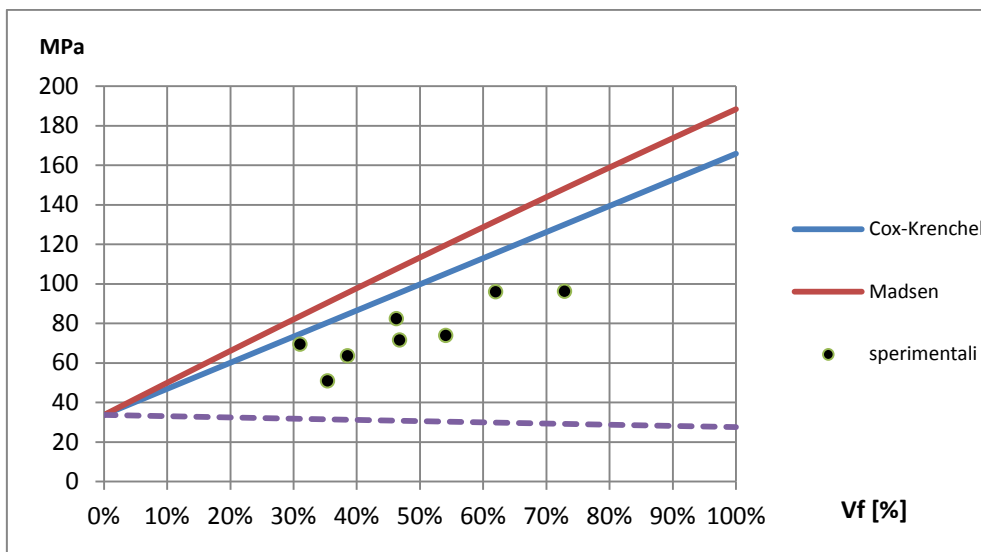



***Fig. 4.128*** *Diagramma della resistenza a trazione in funzione della percentuale in volume di rinforzo per i laminati rinforzati con tessuto B6240C*

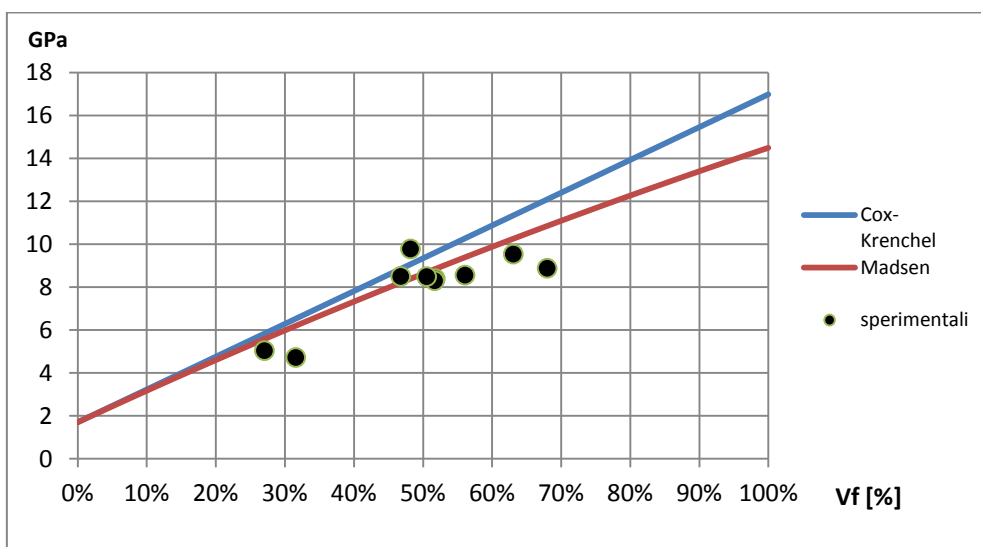



***Fig. 4.129*** *Diagramma del modulo elastico in funzione della percentuale in volume di rinforzo per i laminati rinforzati con tessuto Biotex*

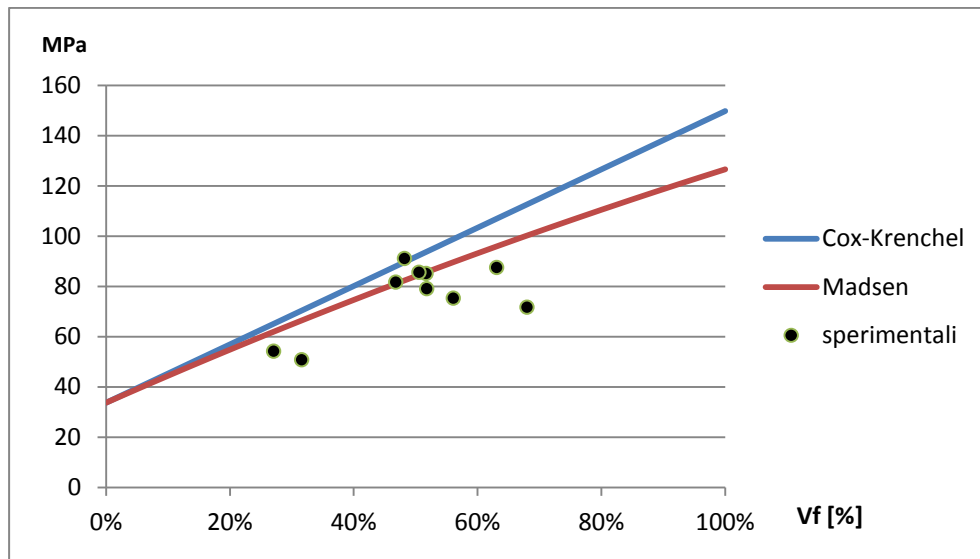



***Fig. 4.130*** *Diagramma della resistenza a trazione in funzione della percentuale in volume di rinforzo per i laminati rinforzati con tessuto Biotex*

Dai diagrammi esposti si evince che i modelli previsionali presi in esame sono in grado di predire le caratteristiche di un materiale composito, a partire dalle caratteristiche dei suoi componenti, con una discreta approssimazione. Nessuno dei due tuttavia ha dimostrato essere migliore dell'altro. Inoltre, il modello di Cox-Krenchel generalmente tende a sovrastimare eccessivamente le proprietà meccaniche.

La stima è ancora più imprecisa e nettamente sottostimata nel caso di utilizzo dei parametri meccanici dei filati allo stato asciutto.

In definitiva si può affermare che i modelli previsionali non permettono una stima accurata delle proprietà di un composito rinforzato con tessuti del tipo Mat, mentre consentono di ottenere, a partire dalle proprietà delle singole fibre presenti in letteratura, una stima non accettabile a livello ingegneristico per i compositi rinforzati con tessuti orientati (es. bidirezionale come il B607, B6240C e Biotex).

Tuttavia è stata valutata l'opportunità di poter continuare ad utilizzare il modello previsionale di Madsen, più preciso e coerente con la natura dei compositi rinforzati con fibre vegetali, determinando a posteriori le proprietà meccaniche apparenti dei filati quando immersi nella resina.

Si tratta di determinare per ciascuna tipologia di laminato realizzato, utilizzando le formule inverse (Back Calculation) del modello di Madsen, i valori del modulo elastico e della resistenza a trazione ei filati. Le medie di

tali valori costituiscono i nuovi parametri meccanici da inserire nel modello per ottenere le proprietà meccaniche a qualsiasi percentuale in volume di rinforzo.

Di seguito si riportano i valori mediati, per ciasscuna tipologia di laminato, delle proprietà meccaniche adottate nei modelli.

***Tab. 4.20*** *Tabelle delle proprietà meccaniche ottenute per "back calculation" e adottate nei modelli previsionali*

| tessuto | E [GPa] | s.q.m. [GPa] | $\sigma_f$ [MPa] | s.q.m. [MPa] |
|---|---|---|---|---|
| **B607** | 32,1 | 3,2 | 279,6 | 61,9 |
| **B624OC** | 28,9 | 4,2 | 249,1 | 41,5 |
| **Biotex** | 31,5 | 3,6 | 272,0 | 30,2 |

I diagrammi sono calcolati con il modello di Madsen con una frazione in volume di vuoti calcolata secondo le stesse modalità viste nell'applicazione precedente dei modelli previsionali.

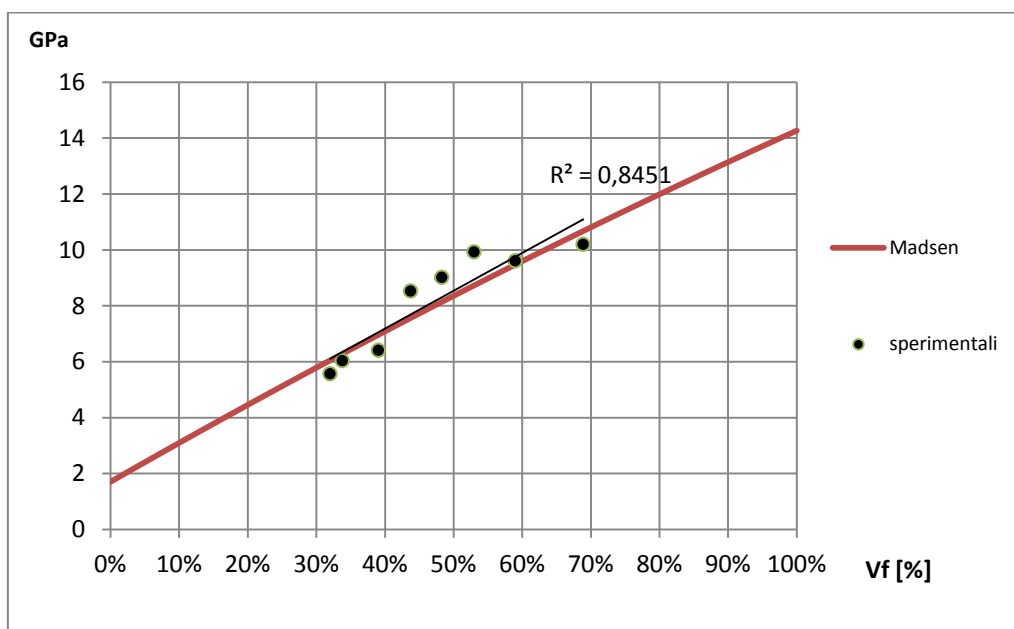



***Fig. 4.131*** *Diagramma del modulo elastico in funzione della percentuale in volume di rinforzo per i laminati rinforzati con tessuto B607 (proprietà meccaniche per "back calculation")*

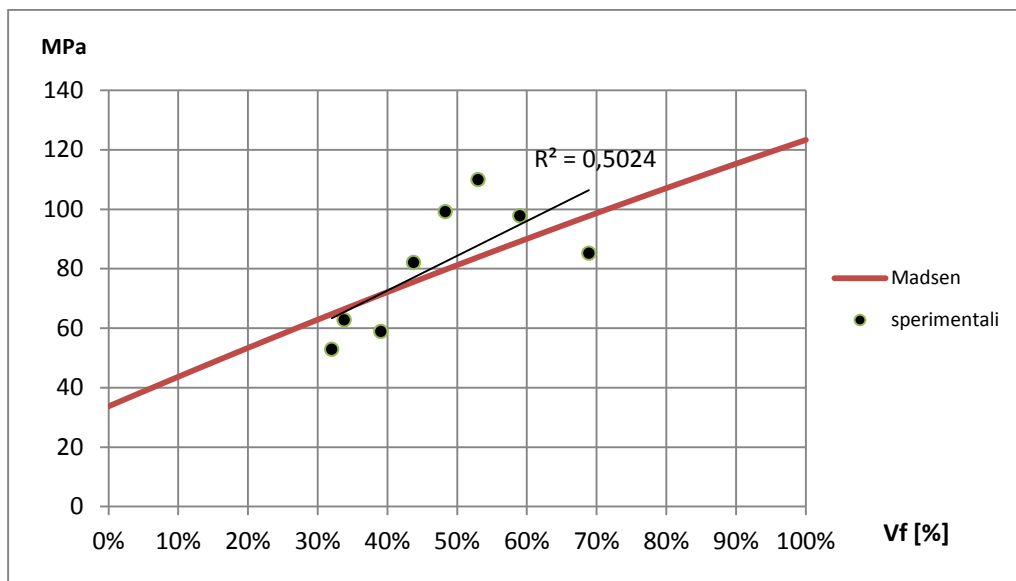



***Fig. 4.132*** *Diagramma della resistenza a trazione in funzione della percentuale in volume di rinforzo per i laminati rinforzati con tessuto B607 (proprietà meccaniche per "back calculation")*

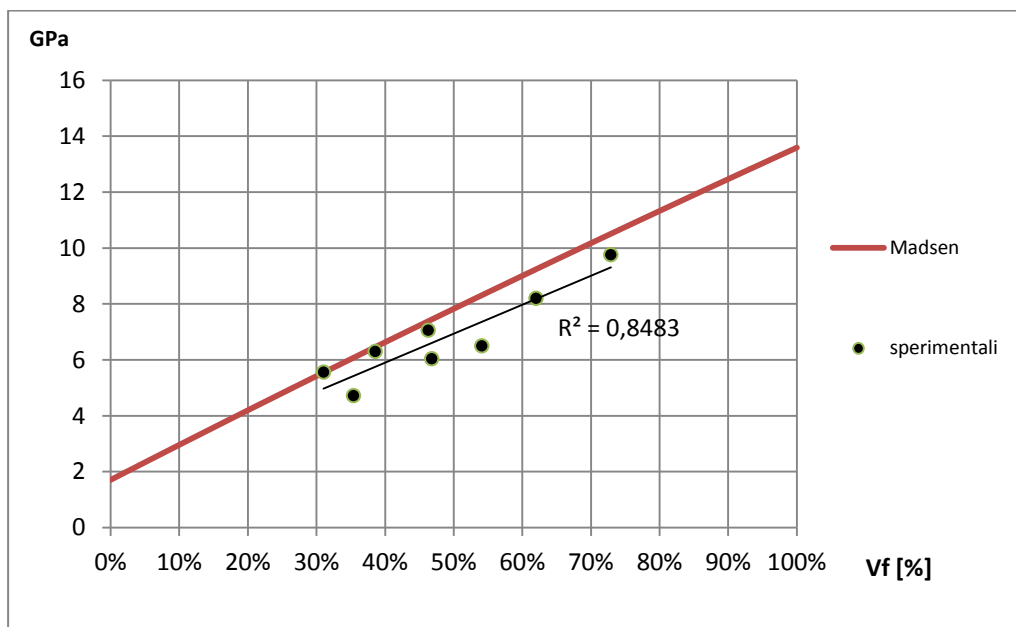



***Fig. 4.133*** *Diagramma del modulo elastico in funzione della percentuale in volume di rinforzo per i laminati rinforzati con tessuto B6240C (proprietà meccaniche per "back calculation")*

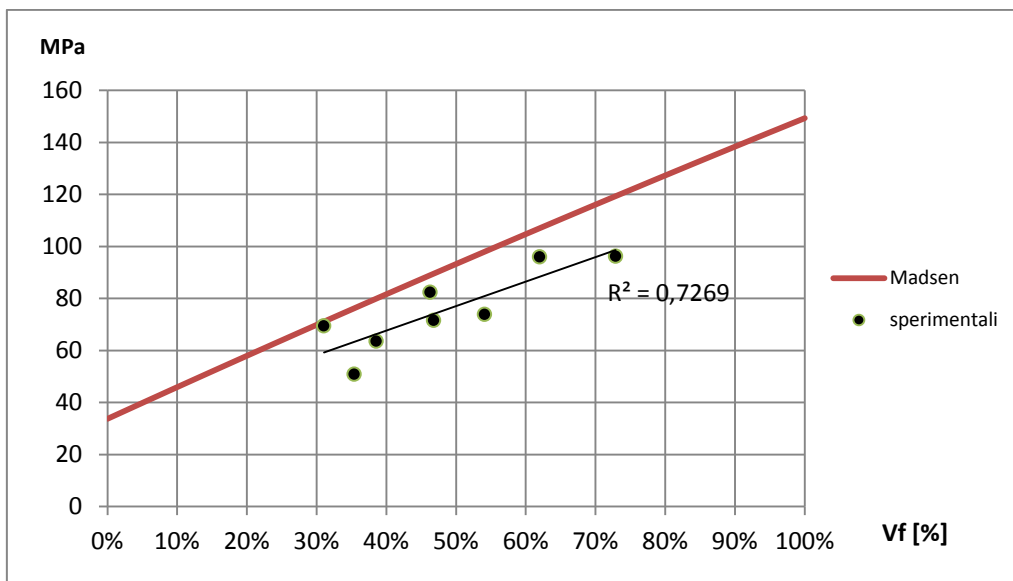



***Fig. 4.134*** *Diagramma della resistenza a trazione in funzione della percentuale in volume di rinforzo per i laminati rinforzati con tessuto B6240C (proprietà meccaniche per "back calculation")*

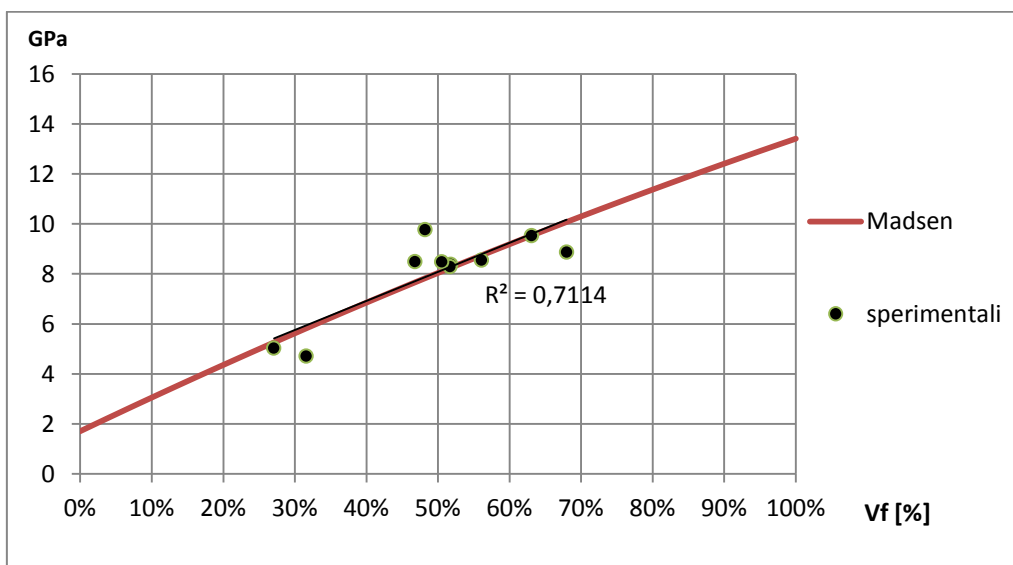



***Fig. 4.135*** *Diagramma del modulo elastico in funzione della percentuale in volume di rinforzo per i laminati rinforzati con tessuto Biotex (proprietà meccaniche per "back calculation")*

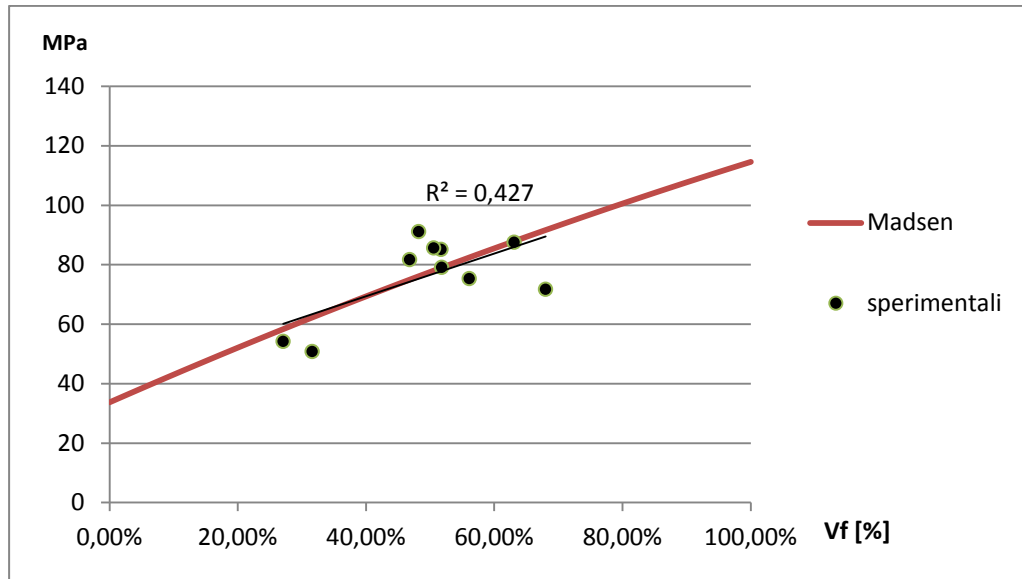



***Fig. 4.137*** *Diagramma della resistenza a trazione in funzione della percentuale in volume di rinforzo per i laminati rinforzati con tessuto B6240C (proprietà meccaniche per "back calculation")*

Come dimostrano i diagrammi appena ottenuti, il modello previsionale di Madsen applicato a partire dalle proprietà dei filati ottenuti per *back calculation* permettono di ottenere stime accettabili dal punto ingegneristico per le proprietà meccaniche dei compositi rinforzati con tessuti di fibre vegetali. L'evidenza trova conferma nei recenti studi condotti da Madsen [88-91].

### 4.5.6 DETERMINAZIONE DELLA CONDUCIBILITÁ TERMICA DEI LAMINATI IN COMPOSITO PRODOTTI

La resina pura e i laminati prodotti in Resin Transfer Molding, utilizzando tessuti Mat, B607 e B6240 non trattati chimicamente, sono stati sottoposti alla prova specifica, descritta all'inizio del capitolo, al fine di determinarne la conducibilità termica.

Al momento della stesura del presente lavoro di tesi non sono, purtroppo, disponibili i dati relativi ai laminati prodotti secondo il processo del Bag Molding per i tessuti B607, B6240C e Biotex, utili per studiare in pieno l'influenza della percentuale in volume di fibra e dei vuoti.

La prova è stata effettuata presso i laboratori dell'Istituto PUK della Technische Universitat di Clausthal (Germania), nel rispetto delle seguenti condizioni operative:

• Campo di temperatura: da 20 °C a 60 ° C.

• Ambiente: aria

Il campo di temperatura investigato è sufficiente per una completa caratterizzazione dei materiali nell'ipotesi di impiego nel settore civile residenziale. Il test è stato condotto ad una temperatura non superiore ai 60°C per problemi di stabilità del sistema resina (la temperatura di transizione vetrosa inferiore dei compositi è, infatti, circa 70°C, temperatura alla quale il composito perde le proprietà elastiche caratteristiche). Per problemi legati allo strumento non è stato, invece, possibile investigare il comportamento dei materiali ad una temperatura inferiore ai 20°C.

Nella tabella 4.21 sono riportati i risultati sperimentali ottenuti nella campagna di misurazione condotta.

Dalla tabella si evince la dipendenza della conducibilità termica dalla densità del composito, quindi dal contenuto in volume di fibre, e dalla percentuale in volume di "vuoti". In realtà nei compositi quando si parla di "vuoti" ci si riferisce ad un volume non occupato da resina o rinforzo, quindi, occupato dall'aria che a 300 °K ha una conducibilità termica pari a 0,026 W/mK.

***Tab. 4.21*** *Conducibilità termica dei laminati prodotti in RTM*

| | Iniezione | % rinforzo $V_p$ | % vuoti $V_v$ | Densità ρ [g/cm³] | Conducibilità Termica [W/m K] | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 20°C | 30°C | 40°C | 50°C | 60°C |
| Resina | - | 0 | 0 | 1,093 | 0,081 | 0,083 | 0,085 | 0,091 | 0,099 |
| Mat | 1 | 14,1 | 0,7 | 1,117 | 0,241 | 0,244 | 0,244 | 0,245 | 0,247 |
| | 2 | 25,8 | 0,7 | 1,140 | 0,243 | 0,244 | 0,244 | 0,243 | 0,247 |
| B607 | 1 | 32,0 | 1,4 | 1,159 | 0,281 | 0,284 | 0,287 | 0,290 | 0,294 |
| | 2 | 39,0 | 1,7 | 1,172 | 0,301 | 0,304 | 0,304 | 0,306 | 0,311 |
| | 3 | 43,7 | 1,7 | 1,184 | 0,322 | 0,320 | 0,323 | 0,328 | 0,337 |
| B6240C | 1 | 31,0 | 0,9 | 1,144 | 0,338 | 0,342 | 0,345 | 0,349 | 0,355 |
| | 2 | 38,6 | 1,8 | 1,145 | 0,321 | 0,326 | 0,334 | 0,342 | 0,360 |
| | 3 | 46,3 | 2,6 | 1,159 | 0,343 | 0,348 | 0,350 | 0,353 | 0,361 |

Tutti i laminati realizzati hanno mostrato una conducibilità crescente al crescere della temperatura e, comunque, sempre superiore alla conducibilità termica della resina che ha mostrato un buon potere termoisolante.

In figura 4.139 si riporta il diagramma, in forma aggregata, del comportamento di tutti i laminati che permette di comprendere la dipendenza della conducibilità termica dalla percentuale in volume di fibre e, quindi dalla densità. Per comodità espositiva si è scelto di rappresentare il comportamento a 20°C, ma le osservazioni si possono estendere anche alle altre temperature di prova.

I laminati rinforzati con i tessuti di fibre B6240C hanno conducibilità minore di quelli con B607 grazie all'influenza positiva della presenza delle fibre di cotone nei tessuti che determina un decremento globale della conducibilità termica.

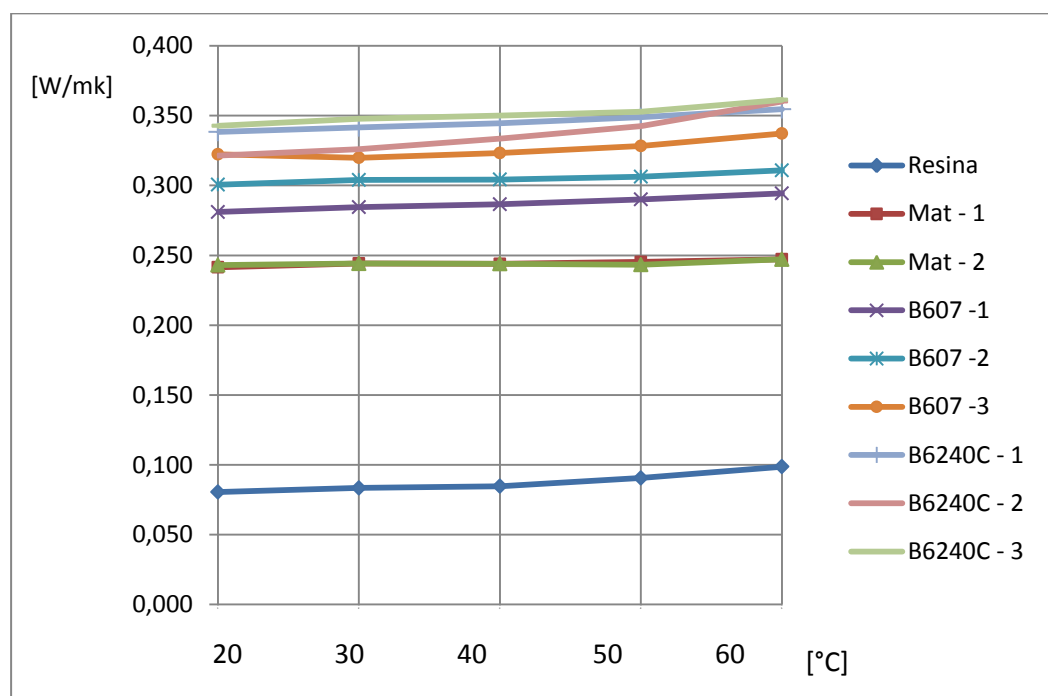



***Fig. 4.138*** *Dipendenza della conducibilità termica dalla temperatura*

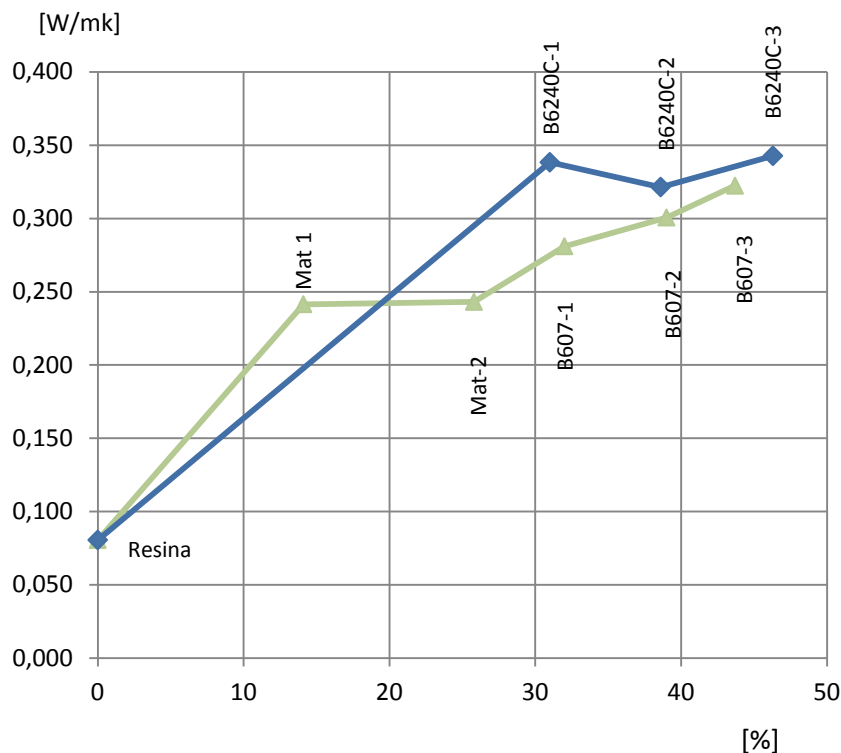



***Fig. 4.139*** *Andamento della conducibilità termica in funzione della percentuale in volume di rinforzo*

## 4.5.7 PROGETTAZIONE DEI PANNELLI SANDWICH

Sono stati progettati quattro tipi di pannelli sandwich variando il laminato composito che costituisce le pelli esterne. In particolare, i laminati selezionati sono quelli realizzati con i quattro tipi di tessuto di rinforzo (Mat, B607, B6240C e Biotex), non trattati chimicamente, che hanno mostrato le migliori proprietà meccaniche, soprattutto in termini di modulo elastico. Poiché i parametri termici determinati sperimentalmente sono quelli dei laminati prodotti in Resin Transfer Molding e le proprietà meccaniche per il B607 e il B6240C (per il Mat non si pone il problema perché realizzato solo in RTM) migliori si ottengono con il processo del Bag Molding, si è operato in modo tale da ottenere comunque una stima verosimile della conducibilità termica anche di tali laminati. In particolare, il valore di conducibilità termica

è stato ottenuto applicando la regola delle miscele. Da questa si ottiene prima, attraverso le formule inverse, la conducibilità termica dei tessuti B607 e B6240 nei tre compositi realizzati in RTM, poi effettuando la media dei valori ottenuti si ottiene il valore di $\lambda_{tessuto_medio}$ da introdurre nella regola per calcolare la conducibilità termica di un laminato a qualunque percentuale in volume di rinforzo.

$$\lambda_{comp} = \lambda_{tessuto} v_f + \lambda_{resina} v_m$$

Di seguito si riportano i calcoli effettuati, considerando che la resina possiede una conducibilità termica pari a 0,081 W/mK.

***Tab. 4.22*** *Conducibilità termica dei tessuti B607 e B6240C*

| | **Iniezione** | **% rinforzo $V_p$** | $\lambda_{comp}$ **20°C** | $\lambda_{tessuto}$ | $\lambda_{tessuto}$ *medio* |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | [W/m K] | [W/m K] | [W/m K] |
| **B607** | 1 | 32,0 | 0,281 | 0,706 | 0,661 |
| | 2 | 39,0 | 0,301 | 0,632 | |
| | 3 | 43,7 | 0,322 | 0,645 | |
| **B6240C** | 1 | 31,0 | 0,338 | 0,910 | 0,753 |
| | 2 | 38,6 | 0,321 | 0,703 | |
| | 3 | 46,3 | 0,343 | 0,646 | |

Nella tabella seguente vengono riportati i dati riepilogativi, anche per la balsa di tipo *standard* che costituisce l'anima dei sandwich, dei parametri meccanici e termici dei componenti presi in considerazione.

***Tab. 4.23*** *Tabella riepilogativa dei parametri meccanici e termici degli elementi costituenti le strutture sandwich*

<table>
<tr><th></th><th>Iniezione</th><th>% rinforzo $V_p$</th><th>Densità $\rho$ [g/cm$^3$]</th><th>Conduc. Termica a 20°C-23°C $\lambda$</th><th>Modulo Elastico trazione E [GPa]</th><th>Resistenza a trazione $\sigma_t$ [MPa]</th><th>Modulo Elastico Compress. E [GPa]</th><th>Resist. Compress. $\sigma_c$ [MPa]</th></tr>
<tr><td>Balsa stand.</td><td>-</td><td>-</td><td>0,155</td><td>0,064</td><td>4,10</td><td>13,5</td><td>4,10</td><td>12,7</td></tr>
<tr><td>Mat</td><td>2</td><td>25,8</td><td>1,140</td><td>0,243</td><td>3,59</td><td>51,84</td><td rowspan="4">1,71</td><td rowspan="4">33,75</td></tr>
<tr><td>B607</td><td>5</td><td>68,9</td><td>1,246</td><td>0,481</td><td>10,2</td><td>85,21</td></tr>
<tr><td>B6240C</td><td>5</td><td>72,9</td><td>1,202</td><td>0,571</td><td>9,76</td><td>96,26</td></tr>
<tr><td>Biotex</td><td>2</td><td>48,2</td><td>1,218</td><td>-</td><td>9,78</td><td>91,14</td></tr>
</table>

Osservando la tabella si nota che per il Biotex non è fornito alcun valore di conducibilità termica, in quanto, non è stato ancora determinato sperimentalmente. La progettazione dei pannelli sandwich con tessuto Biotex si è, quindi, esaurita con l'analisi delle prestazioni meccaniche.

Per potere procedere con il progetto strutturale dei pannelli sandwich è necessario determinare le azioni sollecitanti, in accordo con la Normativa Tecnica sulle Costruzioni contenuta nel DM 14 gennaio 2008 che sono:

- carichi permanenti strutturali (peso proprio) G1
- carichi permanenti non strutturali (peso portato) G2
- Sovraccarichi variabili Q1
- Carico variabile da neve Q2
- Carico variabile da vento Q3

Il carico variabile da neve Q2 e da vento Q3 sono stati presi in considerazione solo per il progetto e la verifica degli elementi di chiusura orizzontale di copertura.

Questi carichi sono stati calcolati considerando un'ipotetica località di montagna posta a 1000 m sul livello del mare in Sicilia.

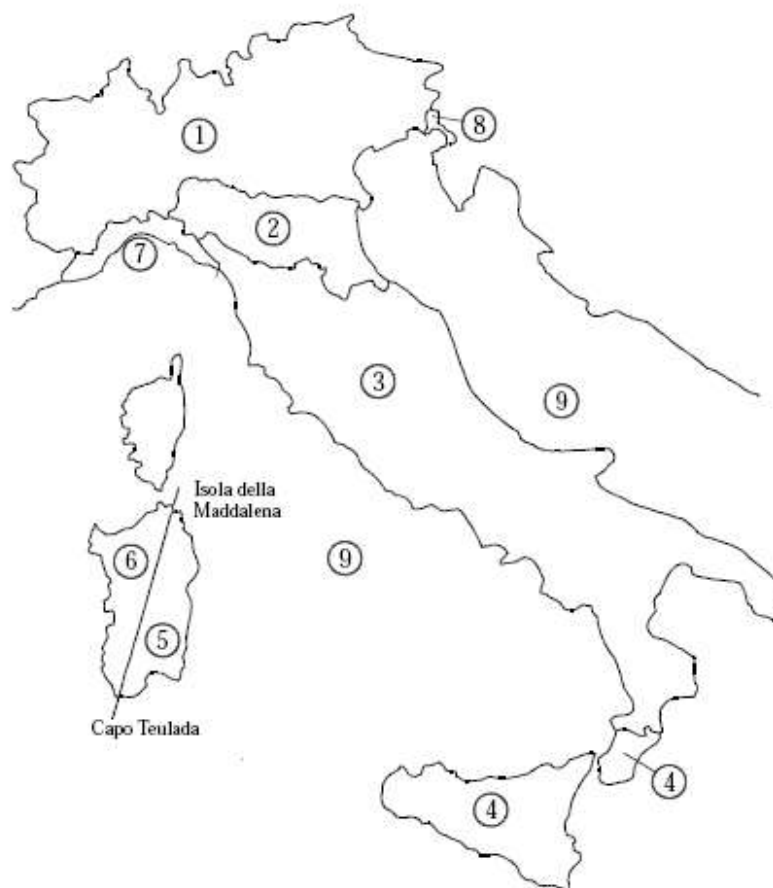



***Fig. 4.140*** *Mappa delle zone in cui è suddiviso il territorio italiano ai fine del calcolo dell'azione del vento*

Per quanto concerne l'azione del vento, considerando che si sta progettando in zona 4, sono stati considerati i seguenti parametri (paragrafo 3.3 del DM 14 gennaio 2008):

- $a_s$=1000 m altitudine del sito in esame;
- $a_0$=500 m altitudine del sito di riferimento;
- $K_a$=0,020 1/s
- $V_{b0}$=28 m/s velocità di riferimento per la zona in esame;
- $V_b = V_{b0}+K_a(a_s-a_0)$=38 m/s velocità caratteristica del vento a 10 m dal suolo su un terreno di categoria di esposizione II, mediata su 10 minuti e riferita ad un periodo di ritorno di 50 anni.
- $\rho_{aria}$= 1,25 $Kg/m^3$

L'azione statica equivalente del vento, nel sito in esame, è la pressione cinetica di riferimento:

$$q_b=1/2\ \rho_{aria}\ V_b^2=902{,}5\ N/m^2$$

L'azione della neve è stata calcolata secondo le indicazioni del paragrafo 3.4 del DM 14 gennaio 2008, adottando i seguenti parametri:

- $\mu_i=0{,}8$
  coefficiente di forma per tetto a due falde e inclinazione 30°

- $q_{sk}=271{,}4\ kg/m^2$
  valore caratteristico di carico di neve al suolo per la zona III in cui ricade la Sicilia.

- $C_e=1{,}00$ coefficiente di esposizione;
- $C_t=1{,}00$ coefficiente termico.

Il carico da neve agente sulla copertura è quindi:

$$q_s=\mu_i\ q_{sk}\ c_e\ c_t=217{,}1\ Kg/m^2$$

Per quanto concerne, invece, il sovraccarico variabile, questo dipende dalla destinazione d'uso dei luoghi in cui sono installati i pannelli e viene fornito dal DM 14 gennaio 2008. Nel caso indagato si è assunto:

- $Q1_{calpestio}=200\ kg/m^2$
  (chiusura calpestio – ambienti ad uso residenziale soggetti a normale affollamento)
- $Q1_{calpestio}=50\ kg/m^2$
  (chiusura copertura - coperture accessibili per sola manutenzione)

Il carico permanente non strutturale è stato assunto pari a 20 kg/m$^2$ per gli elementi di chiusura orizzontale di calpestio e 50 kg/m$^2$ per quelli di copertura.

Le azioni considerate sono state combinate secondo lo schema riportato di seguito, estratto dalla normativa.

***Tab. 4.24*** *Tabella estratta dal DM 14 gennaio 2008, contenente tutte le possibili combinazioni delle azioni*

| | Azione di progetto | Azione permanente | Azione di pretensione | 1° Azione variabile | 2° Azione variabile | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Combinazione** | $E_d$ | $G_k$ | $P_k$ | $Q_{1k}$ | $Q_{2k}$ | **Commento** |
| Stati limite ultimi | | | | | | |
| | *n.1* | $\gamma_g$ | $\gamma_p$ | $\gamma_q \cdot 1$ | $\gamma_q \cdot \psi_{0,2}$ | 2 combinazioni, prendendo a turno una delle 2 azioni variabili come dominante |
| | *n.2* | $\gamma_g$ | $\gamma_p$ | $\gamma_q \cdot \psi_{0,1}$ | $\gamma_q \cdot 1$ | |
| Stati limite di esercizio | | | | | | |
| ***Rara*** | *n.1* | *1* | *1* | $\psi_{0,1}$ | $\psi_{0,2}$ | 1 unica combinazione |
| ***Frequente*** | *n.1* | *1* | *1* | $\psi_{1,2}$ | $\psi_{2,2}$ | 2 combinazioni, prendendo a turno una delle 2 azioni variabili come dominante |
| | *n.2* | *1* | *1* | $\psi_{2,1}$ | $\psi_{1,2}$ | |
| ***Quasi permanente*** | *n.1* | *1* | *1* | $\psi_{2,1}$ | $\psi_{2,2}$ | 1 unica combinazione |

I valori dei coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni agli S.L.U. sono:

- $\gamma_{G1} = 1,4$
- $\gamma_{G2} = 1,5$
- $\gamma_q = 1,5$.

I valori dei coefficienti combinazione sono:
- $\psi_0 = 0,7$
- $\psi_0 = 0,6$ (per neve e vento)
- $\psi_1 = 0,5$
- $\psi_0 = 0,3$ (per neve e vento)
- $\psi_2 = 0,3$
- $\psi_0 = 0,1$ (per neve e vento)

A titolo esplicativo si riporta l'analisi dei carichi effettuata per un pannello di calpestio e di copertura con pelli esterne in Mat-2 (spessore singola pelle s=4,60 mm, spessore totale sandwich pari a 10 cm). Nel calcolo delle combinazioni agli S.L.E. non si considera l'azione del vento perché darebbe un carico sicuramente inferiore al caso in cui è la neve ad avere un effetto dominante.

Nel caso dei pannelli di copertura non si considera, a vantaggio della sicurezza, la componente dei carichi agenti perpendicolare al piano del

sandwich. E' stata invece considerata la componente assiale dei carichi per la verifica di instabilità dei pannelli.

***Tab. 4.25** Analisi dei carichi agli S.L.U. e S.L.E. per la copertura*

| Analisi dei carichi agli S.L.U. | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **[kg/mq]** | **[kg]** | **c.parz.sic.** |
| Carichi permanenti strutturali | **G1** | 24,6 | 410,7 | 1,4 |
| Carichi perm. Non strutturali | **G2** | 50 | 836 | 1,5 |
| Sovraccarichi variabili | **Q1** | 50 | 836 | 1,5 |
| Neve | **Q2** | 217,1 | 3630,7 | 1,5 |
| Vento | **Q3** | 90,3 | 1509,0 | 1,5 |
| Carico totale di progetto 1 | **Fd1** | 461,0 | 7708,7 | (sovraccarichi var. dominanti) |
| Carico totale di progetto 2 | **Fd2** | 568,8 | 9510,9 | (neve dominante) |
| Carico totale di progetto 3 | **Fd3** | 492,7 | 216,8 | (vento dominante) |
| **Analisi dei carichi agli S.L.E.** | | | | |
| | | **[kg/mq]** | **[kg]** | **c.parz.sic.** |
| Carichi permanenti strutturali | **G1** | 24,6 | 410,7 | 1,0 |
| Carichi perm. Non strutturali | **G2** | 50 | 836 | 1,0 |
| Sovraccarichi variabili | **Q1** | 50 | 836 | 1,0 |
| Neve | **Q2** | 217,1 | 3630,7 | 1,0 |
| Carico di progetto (Rara) | **Fd_r** | 239,8 | 4010,3 | |
| Carico di progetto (Frequente 1) | **Fd_f1** | 121,3 | 2027,7 | |
| Carico di progetto (Frequente 2) | **Fd_f2** | 154,7 | 2586,7 | |
| Carico di progetto (Quasi permanente) | **Fd_qp** | 111,3 | 1860,5 | |

***Tab. 4.26** Analisi dei carichi agli S.L.U. e S.L.E. per il solaio di calpestio*

| Analisi dei carichi agli S.L.U. | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **[kg/mq]** | **[kg]** | **c.parz.sic.** |
| Carichi permanenti strutturali | **G1** | 24,6 | 354,7 | 1,4 |
| Carichi perm. Non strutturali | **G2** | 20 | 288,8 | 1,5 |
| Sovraccarichi variabili | **Q1** | 200 | 2888 | 1,5 |
| Carico totale di progetto 1 | **Fd1** | 364,4 | 5261,7 | (sovraccarichi var. dominanti) |
| **Analisi dei carichi agli S.L.E.** | | | | |
| | | **[kg/mq]** | **[kg]** | **c.parz.sic.** |
| Carichi permanenti strutturali | **G1** | 24,6 | 410,7 | 1,0 |
| Carichi perm. Non strutturali | **G2** | 20 | 288,8 | 1,0 |
| Sovraccarichi variabili | **Q1** | 200 | 2888 | 1,0 |
| Carico di progetto (Rara) | **Fd_r** | 184,6 | 2665,1 | |
| Carico di progetto (Frequente 1) | **Fd_f1** | 144,6 | 2087,5 | |
| Carico di progetto (Quasi permanente) | **Fd_qp** | 104,6 | 1509,9 | |

Dalle tabelle si evince che, come ci si aspettava, i carichi agli S.L.U. sono maggiori di quelli agli S.L.E., per cui saranno utilizzati nel corso della

progettazione solo i primi. In particolare, nell'analisi carichi agli S.L.U. è stato di volta in volta selezionato il carico di progetto maggiore tra i tre disponibili, calcolati al variare del carico dominante.

Si seguito si riporta, il calcolo effettuato sul pannello di copertura di cui sono stati appena determinati i carichi di progetto. Il calcolo sul pannello di calpestio è analogo, a meno della verifiche dei carichi assiali descritte in tabella 4.27.

***Tab. 4.27*** *Calcoli preliminari e verifica degli abbassamenti per i pannelli di copertura di cui sono stati calcolati i carichi in tab. 4.25*

| | | | |
|---|---|---|---|
| lunghezza | a | 4,4 | m |
| larghezza | b | 3,8 | m |
| | a/b | 1,16 | - |
| | t | 0,005 | m |
| | c | 0,090 | m |
| | d | 0,095 | m |
| Poisson Composito | v | 0,322 | |
| | g=1-v^2 | 0,90 | |
| | E'=E/g | | |
| | E' compr. | 1985,9 | MPa |
| | E" traz. | 4005,3 | MPa |
| Poisson Balsa | v | 0,23 | |
| | g=1-v^2 | 0,95 | |
| | E'=E/g | 4329,0 | MPa |
| | Gc | 166,0 | MPa |
| | G' | 38,1 | MPa |
| | D | 324694,2 | N mq |
| | ρ | 0,0058 | |
| (da diagr. in funz. di a/b) | K1 | 4 | |
| | Pxmn | 886,8 | KN/m |
| (max carico assiale da Fd2) | Max carico P | 10,8 | KN/m |
| | P/Pxmn | 0,012 | |
| | coeff.corr. | 1,012 | |
| Buckling | **verifica** | | |
| **VERIFICA MASSIMO ABBASSAMENTO** | | | |
| β1 | β2 | β3 | β3 |
| 0,006 | 0,009 | 0,038 | 0,045 |
| β4 | β5 | β6 | |
| 0,055 | 0,036 | 0,038 | |
| carico massimo | q | 4927,0 | N/mq |
| abbassamento massimo | Wmax | 19,377 | mm |
| NON VERIFICA | Wmax/b | 0,510 | % |

***Tab. 4.28*** *Verifica delle tensioni per i pannelli di copertura di cui sono stati calcolati i carici in tab. 4.25*

| VERIFICA TENSIONI | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Resistenza | | Status verifiche |
| σx | 8,58 | MPa | 51,84 | MPa | verifica |
| σy | 9,36 | MPa | 51,84 | MPa | verifica |
| σx | -8,58 | MPa | 33,75 | MPa | verifica |
| σy | -9,36 | MPa | 33,75 | MPa | verifica |
| τxy | 6,10 | MPa | 11,2 | MPa | verifica |
| τzx | 0,01 | MPa | 3,00 | MPa | verifica |
| τyz | 0,01 | MPa | 4,00 | MPa | verifica |

Nella tabella precedente si è considerato, a vantaggio della sicurezza, in mancanza di indagini specifiche, che la resistenza al taglio del laminato sia offerta solo dalla resina, per cui è stato stimato un valore inferiore calcolato come media dei minimi valori trovati nelle schede tecniche di diversi prodotti commerciali.

***Tab. 4.29*** *Verifica di instabilità assiale per i pannelli di copertura di cui sono stati calcolati i carici in tab. 4.25*

| Verifica della tensione dovuta alla componente assiale | | | |
|---|---|---|---|
| Componente carichi orizz. | Fd2 sen30° | N | 47532,6 |
| Area sez.trasv. pann. mq | S | mq | 0,38 |
| Eeq | | MPa | 3886,56 |
| ε=F/S*E | - | 0,000032 | |
| σ=Eε | MPa | 0,06 | Composito |
| | MPa | 0,13 | Balsa |
| | | | |
| | Resistenza | Status verifiche | σ/res |
| | MPa | | |
| Composito | 33,75 | OK | 0,001697 |
| Balsa | 12,7 | OK | 0,01039 |
| | | max | 0,01039 |
| | | P/Pxmn | 0,012 |

La progettazione iterativa tiene conto della possibilità che si possano realizzare laminati compositi con la percentuale in volume di rinforzo e lo spessore voluti.

Le verifiche termo-igrometriche sono state condotte nel rispetto delle normative vigenti, utilizzando il software di calcolo *Termus-G* prodotto e distribuito dall'azienda ACCA Software S.p.A.

Le prestazioni termiche degli elementi di chiusura sono state valutate ipotizzando un possibile impiego nel comune di Enna, situata nella regione Sicilia a circa 1000 m sul livello del mare.

Di seguito si riportano le caratteristiche climatiche della zona di calcolo.

***Fig. 4.141*** *Condizioni climatiche di riferimento per le verifiche termo-igrometriche*

L'adduttanza interna e quella esterna, fissate da normativa sono:

- $R_{si}$= 7,7 W/m$^2$K
- $R_{se}$= 25 W/m$^2$K

Per le verifiche igrometriche si è fatto riferimento ai seguenti valori di permeabilità al vapore:

***Tab. 4.30*** *Permeabilità al vapore dei materiali impiegati*

<table>
<tr><th>Materiale</th><th>Permeabilità al vapore</th><th>U.d.m.</th></tr>
<tr><td>Balsa</td><td>26</td><td rowspan="4">$10^{12}$ Kg/ms Pa</td></tr>
<tr><td>Laminato rinforzato con tessuti Mat</td><td rowspan="3">0,0193</td></tr>
<tr><td>Laminato rinforzato con tessuti B607</td></tr>
<tr><td>Laminato rinforzato con tessuti B6240C</td></tr>
</table>

I valori di trasmittanza da rispettare per zona climatica E, in vigore dal 1 gennaio 2010, sono imposti dal D.lgs. 311/06:

- Pavimenti verso locali non riscaldati/verso l'esterno 0,33 W/mK
- Strutture Opache orizzontali o inclinate 0,30 W/mK
- Strutture opache verticali 0,34 W/mK

Le condizioni climatiche interne, per il calcolo dei diagrammi di Glaser e, quindi, per la verifica di condensa superficiale e interstiziale, sono le seguenti:

***Fig. 4.142*** *Condizioni climatiche interne di riferimento per le verifiche igrometriche mediante diagrammi di Glaser*

Nel seguito si riportano le tabelle contenenti i risultati ottenuti nella progettazione dei pannelli sandwich di chiusura orizzontale inferiore (pannelli dell solaio di calpestio) e superiore (pannelli di copertura), distinti per tipologia di laminato.

La soluzione ottimale adottata è quella che non solo garantisce sufficiente resistenza alle sollecitazioni agenti e abbassamento al centro del pannello inferiore al limite imposto da normativa (possibilmente il minimo), ma anche le migliori *performance* termiche in termini di trasmittanza termica, trasmittanza termica periodica, sfasamento orario, l’assenza di formazione di condensa superficiale sulle pareti e la completa evaporazione della quantità di condensato accumulatosi nei mesi più rigidi.

A parità di prestazioni è stato selezionato il pannello che possiede una densità areale minore, fattore a vantaggio della maneggevolezza e del trasporto.

***Tab. 4.31*** *Progetto e verifica dei pannelli sandwich di chiusura orizzontale inferiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti Mat*

| Spessore pelle esterna (laminati) [mm] | 5 | 10 | 5 | 20 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|
| Spessore balsa [mm] | 90 | 130 | 180 | 160 | 180 |
| Spessore sandwich [mm] | 100 | 150 | 190 | 200 | 200 |
| Wmax/b [%] | 0,257 | 0,219 | 0,271 | 0,158 | 0,225 |
| Limite [%] | 0,400 | | | | |
| Status verifica | SI | SI | SI | SI | SI |
| Status verifica tensioni | SI | SI | SI | SI | SI |
| Trasmittanza termica U [W/mk] | 0,618 | 0,438 | 0,331 | 0,353 | 0,326 |
| Limite [W/mk] | 0,33 | | | | |
| Status verifica | NO | NO | SI | NO | SI |
| Limite U condensa superf. [W/mk] | 0,64 | | | | |
| Status verifica condensa superf. | SI | SI | SI | SI | SI |
| Mese critico | Gennaio | | | | |
| Status verifica accumulo condensa | SI | SI | SI | SI | SI |
| Q.tà stagionale condensato [g/m$^2$] | 12,7 | 6,5 | 13,9 | 3,1 | 6,8 |
| Max accumulo | Marzo | | | | |
| Fatt.attenuazione $f_a$ | 0,88 | 0,66 | 0,46 | 0,44 | 0,43 |
| Trasm.Ter.period. γ [W/m$^2$K] | 0,53 | 0,29 | 0,15 | 0,15 | 0,14 |
| Sfasamento [h] | 3,30 | 6,17 | 8,26 | 9,39 | 8,97 |
| Massa superficiale [kg/m$^2$] | 25,3 | 42,9 | 39,3 | 70,4 | 50,7 |

***Fig. 4.143*** *Verifica igrometrica del pannello sandwich ottimale di chiusura orizzontale inferiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti Mat*

**Codice Struttura:** Mat15
**Descrizione Struttura:** -

| N. | DESCRIZIONE STRATO (da superiore a inferiore) | s [mm] | lambda [W/mK] | C [W/m²K] | M.S. [kg/m²] | P<50*10¹² [kg/msPa] | C.S. [J/kgK] | R [m²K/W] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Adduttanza Superiore | 0 | | 5.900 | | | 0 | 0.169 |
| 2 | lastra di composito in fibre di canapa a disposizione random (MAT) | 10 | 0.243 | 24.300 | 11.40 | 0.019 | 1703.8 | 0.041 |
| 3 | Lastre di Balsa | 180 | 0.064 | 0.356 | 27.90 | 26.000 | 2386 | 2.813 |
| 4 | lastra di composito in fibre di canapa a disposizione random (MAT) | 10 | 0.243 | 24.300 | 11.40 | 0.019 | 1703.8 | 0.041 |
| 5 | Adduttanza Inferiore | 0 | | 25.000 | | | 0 | 0.040 |

| | | |
|---|---|---|
| **RESISTENZA = 3.104 m²K/W** | **CAPACITA' TERMICA AREICA (sup) = 29.237 kJ/m²K** | **TRASMITTANZA = 0.322 W/m²K** |
| **SPESSORE = 200 mm** | **CAPACITA' TERMICA AREICA (inf) = 33.986 kJ/m²K** | **MASSA SUPERFICIALE = 51 kg/m²** |
| **TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA = 0.14 W/m²K** | **FATTORE DI ATTENUAZIONE = 0.43** | **SFASAMENTO = 8.97 h** |

s = Spessore dello strato; lambda = Conduttività termica del materiale; C = Conduttanza unitaria; M.S. = Massa Superficiale; P<50*10¹² = Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50%; C.S. = Calore Specifico; R = Resistenza termica dei singoli strati; Resistenza - Trasmittanza = Valori di resistenza e trasmittanza reali; Massa Superficiale = Valore calcolato come disposto nell'Allegato A del D.Lgs.192/05 e s.m.i..

| | Ts [°C] | Pss [Pa] | Prs [Pa] | URs [%] | Ti [°C] | Psi [Pa] | Pri [Pa] | URi [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DIAGRAMMI DELLE PRESSIONI | 20.0 | 2 337 | 1 168 | 50.0 | -3.0 | 475 | 284 | 59.8 |

Ts = Temperatura superiore; Pss = Pressione di saturazione superiore; Prs = Pressione relativa superiore; URs = Umidità superiore; Ti = Temperatura inferiore; Psi = Pressione di saturazione inferiore; Pri = Pressione relativa inferiore; URi = Umidità inferiore.

**VERIFICA IGROMETRICA**

| | gen | feb | mar | apr | mag | giu | lug | ago | set | ott | nov | dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| URcf1 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 |
| Tcf1 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 |
| URcf2 | 81.50 | 72.70 | 61.00 | 55.40 | 68.40 | 44.50 | 46.00 | 39.90 | 55.60 | 68.50 | 86.50 | 87.70 |
| Tcf2 | 4.50 | 5.10 | 7.10 | 10.70 | 14.90 | 20.60 | 23.90 | 23.20 | 19.90 | 14.50 | 9.80 | 6.40 |

| | | |
|---|---|---|
| **Verifica Interstiziale** | VERIFICATA | La struttura, pur essendo soggetta a fenomeni di condensa interstiziale, risulta verificata in quanto la quantità stagionale di condensato, pari a 0.0068 kg/m², evapora durante la stagione estiva.<br>Il mese in cui si raggiunge il massimo accumulo di condensa è Marzo. |
| **Verifica Superficiale** | VERIFICATA | Valore massimo ammissibile di U = 0.6398 (mese critico: Gennaio). |

La verifica igrometrica è stata eseguita secondo UNI EN ISO 13788.

cf1 = vano interno

cf2 = Esterno

***Fig. 4.144*** *Verifica termo-igrometrica del pannello sandwich ottimale di chiusura orizzontale inferiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti Mat*

***Tab. 4.32*** *Progetto e verifica dei pannelli sandwich di chiusura orizzontale superiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti Mat*

| Spessore pelle esterna (laminati) [mm] | 5 | 5 | 5 | 20 | 10 | 5 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Spessore balsa [mm] | 90 | 80 | 180 | 160 | 180 | 200 | 200 |
| Spessore sandwich [mm] | 100 | 90 | 190 | 200 | 200 | 210 | 220 |
| Wmax/b [%] | 0,501 | 0,499 | 0,519 | 0,291 | 0,425 | 0,523 | 0,426 |
| Limite [%] | 0,500 | | | | | | |
| Status verifica | NO | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| Status verifica instabilità assiale | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Status verifica tensioni | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Trasmittanza termica U [W/mk] | 0,618 | 0,684 | 0,331 | 0,353 | 0,326 | 0,300 | 0,296 |
| Limite [W/mk] | 0,30 | | | | | | |
| Status verifica | NO | NO | NO | NO | NO | SI | SI |
| Limite U condensa superf. [W/mk] | 0,64 | | | | | | |
| Status verifica condensa superf. | SI | NO | SI | SI | SI | SI | SI |
| Mese critico | Gennaio | | | | | | |
| Status verifica accumulo condensa | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Q.tà stagionale condensato [g/m$^2$] | 12,7 | 12,4 | 13,9 | 3,1 | 6,8 | 14,0 | 6,9 |
| Max accumulo | Marzo | | | | | | |
| Fatt.attenuazione $f_a$ | 0,88 | 0,91 | 0,46 | 0,44 | 0,43 | 0,38 | 0,36 |
| Trasm.Ter.period .γ [W/m$^2$K] | 0,56 | 0,61 | 0,15 | 0,15 | 0,14 | 0,11 | 0,10 |
| Sfasamento [h] | 3,30 | 2,81 | 8,26 | 9,39 | 8,97 | 9,37 | 10,08 |
| Massa superficiale [kg/m$^2$] | 25,3 | 23,8 | 39,3 | 70,4 | 50,7 | 42,4 | 52,2 |

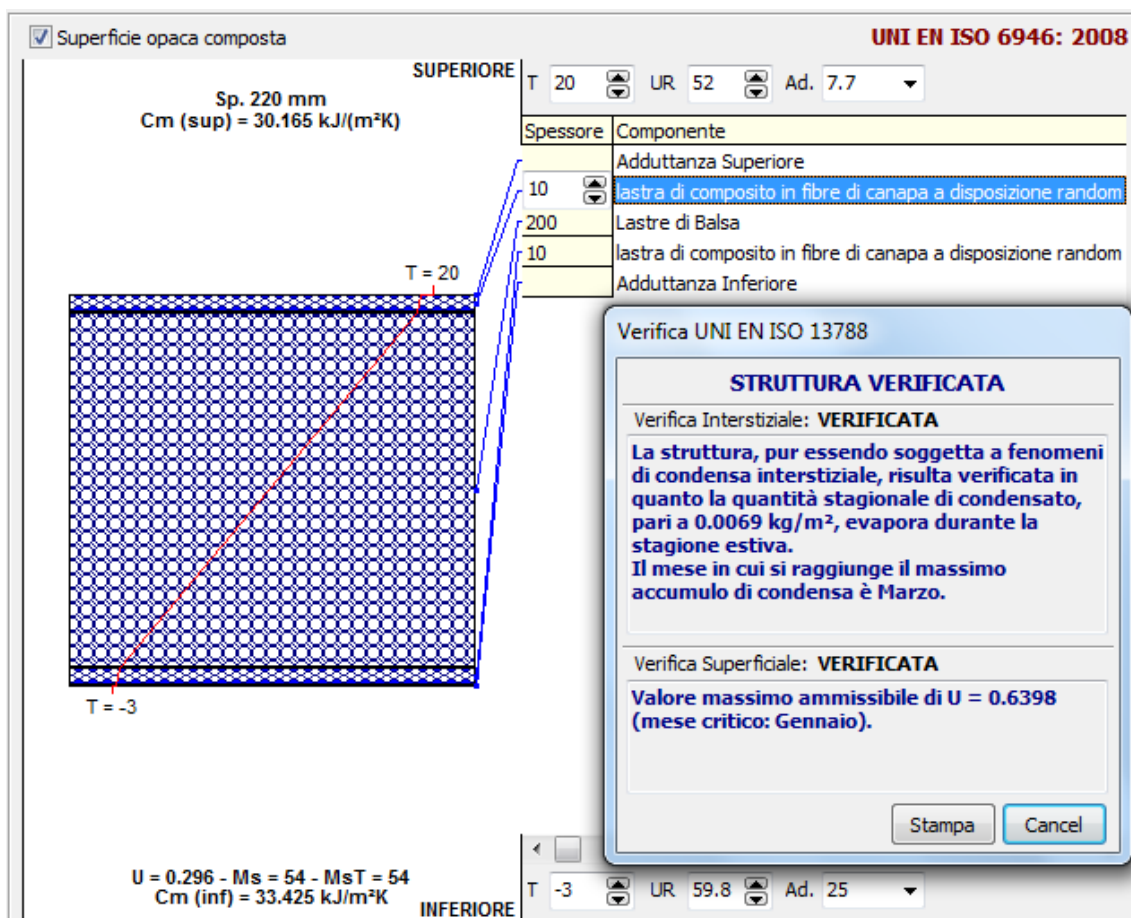



***Fig. 4.145*** *Verifica igrometrica del pannello sandwich ottimale di chiusura orizzontale superiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti Mat*

***Fig. 4.146*** *Un prototipo di pannello sandwich realizzato presso il D.I.I.M. con pelli esterne in laminato rinforzato con tessuto Mat (spessore complessivo pari a 10 cm)*

**Codice Struttura:** Mat15
**Descrizione Struttura:** -

| N. | DESCRIZIONE STRATO (da superiore a inferiore) | s [mm] | lambda [W/mK] | C [W/m²K] | M.S. [kg/m²] | P<50*10¹² [kg/msPa] | C.S. [J/kgK] | R [m²K/W] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Adduttanza Superiore | 0 | | 5.900 | | | 0 | 0.169 |
| 2 | lastra di composito in fibre di canapa a disposizione random (MAT) | 10 | 0.243 | 24.300 | 11.40 | 0.019 | 1703.8 | 0.041 |
| 3 | Lastre di Balsa | 200 | 0.064 | 0.320 | 31.00 | 26.000 | 2386 | 3.125 |
| 4 | lastra di composito in fibre di canapa a disposizione random (MAT) | 10 | 0.243 | 24.300 | 11.40 | 0.019 | 1703.8 | 0.041 |
| 5 | Adduttanza Inferiore | 0 | | 25.000 | | | 0 | 0.040 |

| | | |
|---|---|---|
| **RESISTENZA = 3.417 m²K/W** | **CAPACITA' TERMICA AREICA (sup) = 28.629 kJ/m²K** | **TRASMITTANZA = 0.293 W/m²K** |
| **SPESSORE = 220 mm** | **CAPACITA' TERMICA AREICA (inf) = 33.308 kJ/m²K** | **MASSA SUPERFICIALE = 54 kg/m²** |
| **TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA = 0.10 W/m²K** | **FATTORE DI ATTENUAZIONE = 0.36** | **SFASAMENTO = 10.08 h** |

s = Spessore dello strato; lambda = Conduttività termica del materiale; C = Conduttanza unitaria; M.S. = Massa Superficiale; P<50*10¹² = Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50%; C.S. = Calore Specifico; R = Resistenza termica dei singoli strati; Resistenza - Trasmittanza = Valori di resistenza e trasmittanza reali; Massa Superficiale = Valore calcolato come disposto nell'Allegato A del D.Lgs.192/05 e s.m.i..

| | Ts [°C] | Pss [Pa] | Prs [Pa] | URs [%] | Ti [°C] | Psi [Pa] | Pri [Pa] | URi [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DIAGRAMMI DELLE PRESSIONI | 20.0 | 2 337 | 1 168 | 50.0 | -3.0 | 475 | 284 | 59.8 |

Ts = Temperatura superiore; Pss = Pressione di saturazione superiore; Prs = Pressione relativa superiore; URs = Umidità superiore; Ti = Temperatura inferiore; Psi = Pressione di saturazione inferiore; Pri = Pressione relativa inferiore; URi = Umidità inferiore.

**V E R I F I C A   I G R O M E T R I C A**

| | gen | feb | mar | apr | mag | giu | lug | ago | set | ott | nov | dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| URcf1 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 |
| Tcf1 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 |
| URcf2 | 81.50 | 72.70 | 61.00 | 55.40 | 68.40 | 44.50 | 46.00 | 39.90 | 55.60 | 68.50 | 86.50 | 87.70 |
| Tcf2 | 4.50 | 5.10 | 7.10 | 10.70 | 14.90 | 20.60 | 23.90 | 23.20 | 19.90 | 14.50 | 9.80 | 6.40 |

| | | |
|---|---|---|
| **Verifica Interstiziale** | VERIFICATA | La struttura, pur essendo soggetta a fenomeni di condensa interstiziale, risulta verificata in quanto la quantità stagionale di condensato, pari a 0.0069 kg/m², evapora durante la stagione estiva. Il mese in cui si raggiunge il massimo accumulo di condensa è Marzo. |
| **Verifica Superficiale** | VERIFICATA | Valore massimo ammissibile di U = 0.6398 (mese critico: Gennaio). |

La verifica igrometrica è stata eseguita secondo UNI EN ISO 13788.

cf1 = vano interno

cf2 = Esterno

***Fig. 4.147*** *Verifica termo-igrometrica del pannello sandwich ottimale di chiusura orizzontale superiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti Mat*

***Tab. 4.33*** *Progetto e verifica dei pannelli sandwich di chiusura orizzontale inferiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti B607*

| Spessore pelle esterna (laminati) [mm] | 5 | 5 | 10 | 10 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Spessore balsa [mm] | 90 | 140 | 140 | 180 | 190 |
| Spessore sandwich [mm] | 100 | 150 | 10 | 200 | 200 |
| Wmax/b [%] | 0,206 | 0,213 | 0,153 | 0,157 | 0,218 |
| Limite [%] | 0,400 | | | | |
| Status verifica | SI | SI | SI | SI | SI |
| Status verifica tensioni | SI | SI | SI | SI | SI |
| Trasmittanza termica U [W/mk] | 0,626 | 0,420 | 0,417 | 0,331 | 0,317 |
| Limite [W/mk] | 0,33 | | | | |
| Status verifica | NO | NO | NO | SI | SI |
| Limite U condensa superf. [W/mk] | 1,46 | | | | |
| Status verifica condensa superf. | SI | SI | SI | SI | SI |
| Mese critico | Gennaio | | | | |
| Status verifica accumulo condensa | SI | SI | SI | SI | SI |
| Q.tà stagionale condensato [g/m$^2$] | 13,2 | 13,9 | 6,9 | 7,1 | 14,2 |
| Max accumulo | Marzo | | | | |
| Fatt.attenuazione $f_a$ | 0,88 | 0,66 | 0,63 | 0,44 | 0,42 |
| Trasm.Ter.period.γ [W/m$^2$K] | 0,54 | 0,27 | 0,26 | 0,14 | 0,13 |
| Sfasamento [h] | 3,26 | 5,96 | 6,59 | 8,84 | 8,77 |
| Massa superficiale [kg/m$^2$] | 26,4 | 35,7 | 46,6 | 52,8 | 41,91 |

***Fig. 4.148*** *Verifica igrometrica del pannello sandwich ottimale di chiusura orizzontale inferiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti B607*

**Codice Struttura:** B607
**Descrizione Struttura:** -

| N. | DESCRIZIONE STRATO (da superiore a inferiore) | s [mm] | lambda [W/mK] | C [W/m²K] | M.S. [kg/m²] | P<50*10¹² [kg/msPa] | C.S. [J/kgK] | R [m²K/W] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Adduttanza Superiore | 0 | | 5.900 | | | 0 | 0.169 |
| 2 | Pannello in B607 al 68,9% di fibre di canapa in tessuto B6070 | 10 | 0.481 | 48.100 | 11.84 | 0.019 | 1746.7 | 0.021 |
| 3 | Lastre di Balsa | 180 | 0.064 | 0.356 | 27.90 | 26.000 | 2386 | 2.813 |
| 4 | Pannello in B607 al 68,9% di fibre di canapa in tessuto B6070 | 10 | 0.481 | 48.100 | 11.84 | 0.019 | 1746.7 | 0.021 |
| 5 | Adduttanza Inferiore | 0 | | 25.000 | | | 0 | 0.040 |

| | | |
|---|---|---|
| **RESISTENZA = 3.064 m²K/W** | **CAPACITA' TERMICA AREICA (sup) = 30.663 kJ/m²K** | **TRASMITTANZA = 0.326 W/m²K** |
| **SPESSORE = 200 mm** | **CAPACITA' TERMICA AREICA (inf) = 35.760 kJ/m²K** | **MASSA SUPERFICIALE = 52 kg/m²** |
| **TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA = 0.14 W/m²K** | **FATTORE DI ATTENUAZIONE = 0.44** | **SFASAMENTO = 8.84 h** |

s = Spessore dello strato; lambda = Conduttività termica del materiale; C = Conduttanza unitaria; M.S. = Massa Superficiale; P<50*10¹² = Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50%; C.S. = Calore Specifico; R = Resistenza termica dei singoli strati; Resistenza - Trasmittanza = Valori di resistenza e trasmittanza reali; Massa Superficiale = Valore calcolato come disposto nell'Allegato A del D.Lgs.192/05 e s.m.i..

| | Ts [°C] | Pss [Pa] | Prs [Pa] | URs [%] | Ti [°C] | Psi [Pa] | Pri [Pa] | URi [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DIAGRAMMI DELLE PRESSIONI | 20.0 | 2 337 | 1 168 | 50.0 | -3.0 | 475 | 284 | 59.8 |

Ts = Temperatura superiore; Pss = Pressione di saturazione superiore; Prs = Pressione relativa superiore; URs = Umidità superiore; Ti = Temperatura inferiore; Psi = Pressione di saturazione inferiore; Pri = Pressione relativa inferiore; URi = Umidità inferiore.

**VERIFICA IGROMETRICA**

| | gen | feb | mar | apr | mag | giu | lug | ago | set | ott | nov | dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| URcf1 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 |
| Tcf1 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 |
| URcf2 | 81.50 | 72.70 | 61.00 | 55.40 | 68.40 | 44.50 | 46.00 | 39.90 | 55.60 | 68.50 | 86.50 | 87.70 |
| Tcf2 | 4.50 | 5.10 | 7.10 | 10.70 | 14.90 | 20.60 | 23.90 | 23.20 | 19.90 | 14.50 | 9.80 | 6.40 |

| | | |
|---|---|---|
| **Verifica Interstiziale** | VERIFICATA | La struttura, pur essendo soggetta a fenomeni di condensa interstiziale, risulta verificata in quanto la quantità stagionale di condensato, pari a 0.0071 kg/m², evapora durante la stagione estiva. Il mese in cui si raggiunge il massimo accumulo di condensa è Marzo. |
| **Verifica Superficiale** | VERIFICATA | Valore massimo ammissibile di U = 0.6398 (mese critico: Gennaio). |

La verifica igrometrica è stata eseguita secondo UNI EN ISO 13788.

cf1 = vano interno

cf2 = Esterno

***Fig. 4.149*** *Verifica termo-igrometrica del pannello sandwich ottimale di chiusura orizzontale inferiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti B607*

***Tab. 4.34*** *Progetto e verifica dei pannelli sandwich di chiusura orizzontale superiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti B607*

| Spessore pelle esterna (laminati) [mm] | 5 | 5 | 5 | 15 | 20 | 10 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Spessore balsa [mm] | 90 | 140 | 190 | 170 | 200 | 180 | 200 |
| Spessore sandwich [mm] | 100 | 150 | 200 | 200 | 240 | 200 | 220 |
| Wmax/b [%] | 0,399 | 0,407 | 0,415 | 0,220 | 0,173 | 0,294 | 0,296 |
| Limite [%] | 0,500 | | | | | | |
| Status verifica | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Status verifica instabilità assiale | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Status verifica tensioni | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Trasmittanza termica U [W/mk] | 0,626 | 0,420 | 0,317 | 0,346 | 0,296 | 0,331 | 0,300 |
| Limite [W/mk] | 0,30 | | | | | | |
| Status verifica | NO | NO | NO | NO | SI | NO | SI |
| Limite U x condensa superf. [W/mk] | 0,64 | | | | | | |
| Status verifica condensa superf. | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Mese Critico | Gennaio | | | | | | |
| Status verifica accumulo condensa | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Q.tà stagionale condensato [g/m$^2$] | 13,2 | 13,9 | 14,2 | 4,6 | 3,5 | 7,1 | 7,2 |
| Max accumulo | Marzo | | | | | | |
| Fatt.attenuazione $f_a$ | 0,88 | 0,66 | 0,42 | 0,46 | 0,32 | 0,44 | 0,37 |
| Trasm.Ter.period .γ [W/m$^2$K] | 0,54 | 0,27 | 0,13 | 0,16 | 0,09 | 0,14 | 0,11 |
| Sfasamento [h] | 3,26 | 5,96 | 8,77 | 8,91 | 11,23 | 8,84 | 9,95 |
| Massa superficiale (peso sandwich) [kg/m$^2$] | 26,4 | 34,3 | 41,9 | 63,7 | 80,8 | 52,8 | 55,9 |

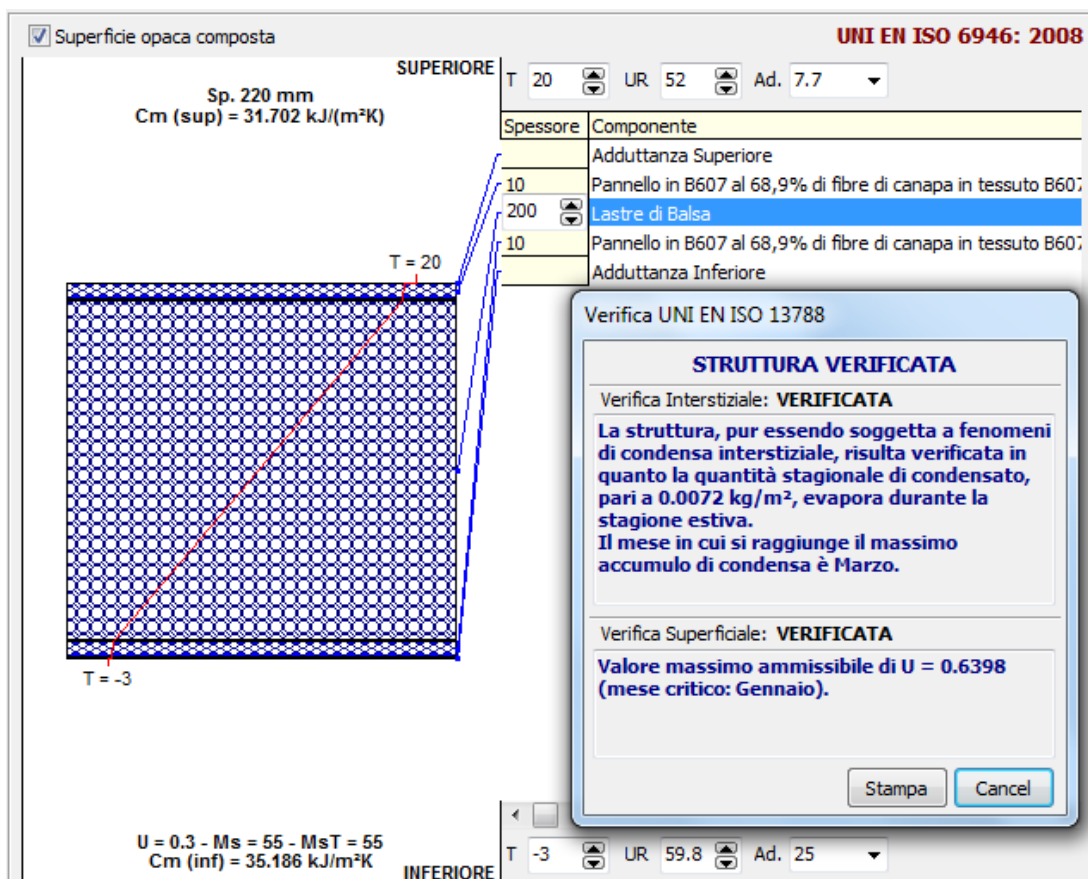



***Fig. 4.150*** *Verifica igrometrica del pannello sandwich ottimale di chiusura orizzontale superiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti B607*

**Codice Struttura:** B607
**Descrizione Struttura:** -

| N. | DESCRIZIONE STRATO (da superiore a inferiore) | s [mm] | lambda [W/mK] | C [W/m²K] | M.S. [kg/m²] | P<50*10¹² [kg/msPa] | C.S. [J/kgK] | R [m²K/W] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Adduttanza Superiore | 0 | | 5.900 | | | 0 | 0.169 |
| 2 | Pannello in B607 al 68,9% di fibre di canapa in tessuto B6070 | 10 | 0.481 | 48.100 | 11.84 | 0.019 | 1746.7 | 0.021 |
| 3 | Lastre di Balsa | 200 | 0.064 | 0.320 | 31.00 | 26.000 | 2386 | 3.125 |
| 4 | Pannello in B607 al 68,9% di fibre di canapa in tessuto B6070 | 10 | 0.481 | 48.100 | 11.84 | 0.019 | 1746.7 | 0.021 |
| 5 | Adduttanza Inferiore | 0 | | 25.000 | | | 0 | 0.040 |

| | | |
|---|---|---|
| RESISTENZA = 3.376 m²K/W | CAPACITA' TERMICA AREICA (sup) = 30.040 kJ/m²K | TRASMITTANZA = 0.296 W/m²K |
| SPESSORE = 220 mm | CAPACITA' TERMICA AREICA (inf) = 35.059 kJ/m²K | MASSA SUPERFICIALE = 55 kg/m² |
| TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA = 0.11 W/m²K | FATTORE DI ATTENUAZIONE = 0.37 | SFASAMENTO = 9.95 h |

s = Spessore dello strato; lambda = Conduttività termica del materiale; C = Conduttanza unitaria; M.S. = Massa Superficiale; P<50*10¹² = Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50%; C.S. = Calore Specifico; R = Resistenza termica dei singoli strati; Resistenza - Trasmittanza = Valori di resistenza e trasmittanza reali; Massa Superficiale = Valore calcolato come disposto nell'Allegato A del D.Lgs.192/05 e s.m.i..

| | Ts [°C] | Pss [Pa] | Prs [Pa] | URs [%] | Ti [°C] | Psi [Pa] | Pri [Pa] | URi [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DIAGRAMMI DELLE PRESSIONI | 20.0 | 2 337 | 1 168 | 50.0 | -3.0 | 475 | 284 | 59.8 |

Ts = Temperatura superiore; Pss = Pressione di saturazione superiore; Prs = Pressione relativa superiore; URs = Umidità superiore; Ti = Temperatura inferiore; Psi = Pressione di saturazione inferiore; Pri = Pressione relativa inferiore; URi = Umidità inferiore.

**V E R I F I C A   I G R O M E T R I C A**

| | gen | feb | mar | apr | mag | giu | lug | ago | set | ott | nov | dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| URcf1 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 |
| Tcf1 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 |
| URcf2 | 81.50 | 72.70 | 61.00 | 55.40 | 68.40 | 44.50 | 46.00 | 39.90 | 55.60 | 68.50 | 86.50 | 87.70 |
| Tcf2 | 4.50 | 5.10 | 7.10 | 10.70 | 14.90 | 20.60 | 23.90 | 23.20 | 19.90 | 14.50 | 9.80 | 6.40 |

| | | |
|---|---|---|
| **Verifica Interstiziale** | VERIFICATA | La struttura, pur essendo soggetta a fenomeni di condensa interstiziale, risulta verificata in quanto la quantità stagionale di condensato, pari a 0.0072 kg/m², evapora durante la stagione estiva.<br>Il mese in cui si raggiunge il massimo accumulo di condensa è Marzo. |
| **Verifica Superficiale** | VERIFICATA | Valore massimo ammissibile di U = 0.6398 (mese critico: Gennaio). |

La verifica igrometrica è stata eseguita secondo UNI EN ISO 13788.

cf1 = vano interno

cf2 = Esterno

***Fig. 4.151*** *Verifica igrometrica del pannello sandwich ottimale di chiusura orizzontale superiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti B607*

***Tab. 4.35*** *Progetto e verifica dei pannelli sandwich di chiusura orizzontale inferiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti B6240C*

| Spessore pelle esterna (laminati) [mm] | 5 | 10 | 5 | 20 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|
| Spessore balsa [mm] | 90 | 130 | 180 | 160 | 180 |
| Spessore sandwich [mm] | 100 | 150 | 190 | 200 | 200 |
| Wmax/b [%] | 0,208 | 0,155 | 0,219 | 0,096 | 0,159 |
| Limite [%] | 0,400 | | | | |
| Status verifica | SI | SI | SI | SI | SI |
| Status verifica tensioni | SI | SI | SI | SI | SI |
| Trasmittanza termica U [W/mk] | 0,627 | 0,447 | 0,333 | 0,365 | 0,331 |
| Limite [W/mk] | 0,33 | | | | |
| Status verifica | NO | NO | SI | NO | SI |
| Limite U x condensa superf. [W/mk] | 1,46 | | | | |
| Status verifica condensa superf. | SI | SI | SI | SI | SI |
| Mese critico | Gennaio | | | | |
| Status verifica accumulo condensa | SI | SI | SI | SI | SI |
| Q.tà stagionale condensato [g/m$^2$] | 13,3 | 6,9 | 14,2 | 3,4 | 7,2 |
| Max accumulo | Marzo | | | | |
| Fatt.attenuazione $f_a$ | 0,88 | 0,68 | 0,47 | 0,48 | 0,45 |
| Trasm.Ter.period.γ [W/m$^2$K] | 0,54 | 0,30 | 0,15 | 0,17 | 0,15 |
| Sfasamento [h] | 3,21 | 5,92 | 8,16 | 8,75 | 8,72 |
| Massa superficiale [kg/m$^2$] | 26,0 | 44,2 | 39,9 | 72,9 | 51,9 |

***Fig. 4.152*** *Verifica igrometrica del pannello sandwich ottimale di chiusura orizzontale inferiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti B6240C*

**Codice Struttura:** B6240C
**Descrizione Struttura:** -

| N. | DESCRIZIONE STRATO (da superiore a inferiore) | s [mm] | lambda [W/mK] | C [W/m²K] | M.S. [kg/m²] | P<50*10¹² [kg/msPa] | C.S. [J/kgK] | R [m²K/W] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Adduttanza Superiore | 0 | | 5.900 | | | 0 | 0.169 |
| 2 | Pannello in B6240 al 72,9% di fibre di canapa/cotone in tessuto B6240 | 10 | 0.571 | 57.100 | 11.59 | 0.019 | 1645.5 | 0.018 |
| 3 | Lastre di Balsa | 180 | 0.064 | 0.356 | 27.90 | 26.000 | 2386 | 2.813 |
| 4 | Pannello in B6240 al 72,9% di fibre di canapa/cotone in tessuto B6240 | 10 | 0.571 | 57.100 | 11.59 | 0.019 | 1645.5 | 0.018 |
| 5 | Adduttanza Inferiore | 0 | | 25.000 | | | 0 | 0.040 |

| | | |
|---|---|---|
| **RESISTENZA = 3.057 m²K/W** | **CAPACITA' TERMICA AREICA (sup) = 29.732 kJ/m²K** | **TRASMITTANZA = 0.327 W/m²K** |
| **SPESSORE = 200 mm** | **CAPACITA' TERMICA AREICA (inf) = 34.504 kJ/m²K** | **MASSA SUPERFICIALE = 51 kg/m²** |
| **TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA = 0.15 W/m²K** | **FATTORE DI ATTENUAZIONE = 0.45** | **SFASAMENTO = 8.72 h** |

s = Spessore dello strato; lambda = Conduttività termica del materiale; C = Conduttanza unitaria; M.S. = Massa Superficiale; P<50*10¹² = Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50%; C.S. = Calore Specifico; R = Resistenza termica dei singoli strati; Resistenza - Trasmittanza = Valori di resistenza e trasmittanza reali; Massa Superficiale = Valore calcolato come disposto nell'Allegato A del D.Lgs.192/05 e s.m.i..

**STRATIGRAFIA STRUTTURA** | **DIAGRAMMI DELLE PRESSIONI**

| | Ts [°C] | Pss [Pa] | Prs [Pa] | URs [%] | Ti [°C] | Psi [Pa] | Pri [Pa] | URi [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DIAGRAMMI DELLE PRESSIONI | 20.0 | 2 337 | 1 168 | 50.0 | -3.0 | 475 | 284 | 59.8 |

Ts = Temperatura superiore; Pss = Pressione di saturazione superiore; Prs = Pressione relativa superiore; URs = Umidità superiore; Ti = Temperatura inferiore; Psi = Pressione di saturazione inferiore; Pri = Pressione relativa inferiore; URi = Umidità inferiore.

**VERIFICA IGROMETRICA**

| | gen | feb | mar | apr | mag | giu | lug | ago | set | ott | nov | dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| URcf1 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 |
| Tcf1 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 |
| URcf2 | 81.50 | 72.70 | 61.00 | 55.40 | 68.40 | 44.50 | 46.00 | 39.90 | 55.60 | 68.50 | 86.50 | 87.70 |
| Tcf2 | 4.50 | 5.10 | 7.10 | 10.70 | 14.90 | 20.60 | 23.90 | 23.20 | 19.90 | 14.50 | 9.80 | 6.40 |

| | | |
|---|---|---|
| **Verifica Interstiziale** | VERIFICATA | La struttura, pur essendo soggetta a fenomeni di condensa interstiziale, risulta verificata in quanto la quantità stagionale di condensato, pari a 0.0072 kg/m², evapora durante la stagione estiva.<br>Il mese in cui si raggiunge il massimo accumulo di condensa è Marzo. |
| **Verifica Superficiale** | VERIFICATA | Valore massimo ammissibile di U = 0.6398 (mese critico: Gennaio). |

La verifica igrometrica è stata eseguita secondo UNI EN ISO 13788.

cf1 = vano interno

cf2 = Esterno

***Fig. 4.153*** *Verifica termo-igrometrica del pannello sandwich ottimale di chiusura orizzontale superiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti B6240C*

*Tab. 4.36 Progetto e verifica dei pannelli sandwich di chiusura orizzontale superiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti B6240C*

| Spessore pelle esterna (laminati) [mm] | 5 | 5 | 5 | 15 | 20 | 10 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Spessore balsa [mm] | 90 | 140 | 190 | 170 | 200 | 180 | 200 |
| Spessore sandwich [mm] | 100 | 150 | 200 | 200 | 240 | 200 | 220 |
| Wmax/b [%] | 0,405 | 0,412 | 0,420 | 0,225 | 0,177 | 0,299 | 0,301 |
| Limite [%] | 0,500 | | | | | | |
| Status verifica | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Status verifica instabilità assiale | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Status verifica tensioni | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Trasmittanza termica U [W/mk] | 0,627 | 0,421 | 0,317 | 0,347 | 0,297 | 0,331 | 0,300 |
| Limite [W/mk] | 0,30 | | | | | | |
| Status verifica | NO | NO | NO | NO | SI | NO | SI |
| Limite U condensa superf. [W/mk] | 0,64 | | | | | | |
| Status verifica condensa superf. | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Mese critico | Gennaio | | | | | | |
| Status verifica accumulo condensa | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Q.tà stagionale condensato [g/m$^2$] | 13,3 | 14,0 | 14,2 | 4,7 | 3,5 | 7,2 | 7,2 |
| Max accumulo | Marzo | | | | | | |
| Fatt.attenuazione $f_a$ | 0,88 | 0,66 | 0,43 | 0,47 | 0,33 | 0,45 | 0,37 |
| Trasm.Ter.period .γ [W/m$^2$K] | 0,54 | 0,27 | 0,13 | 0,16 | 0,10 | 0,15 | 0,11 |
| Sfasamento [h] | 3,21 | 5,91 | 8,72 | 8,74 | 10,98 | 8,72 | 9,84 |
| Massa superficiale (peso sandwich) [kg/m$^2$] | 26,0 | 33,7 | 41,5 | 62,4 | 79,1 | 51,9 | 55,0 |

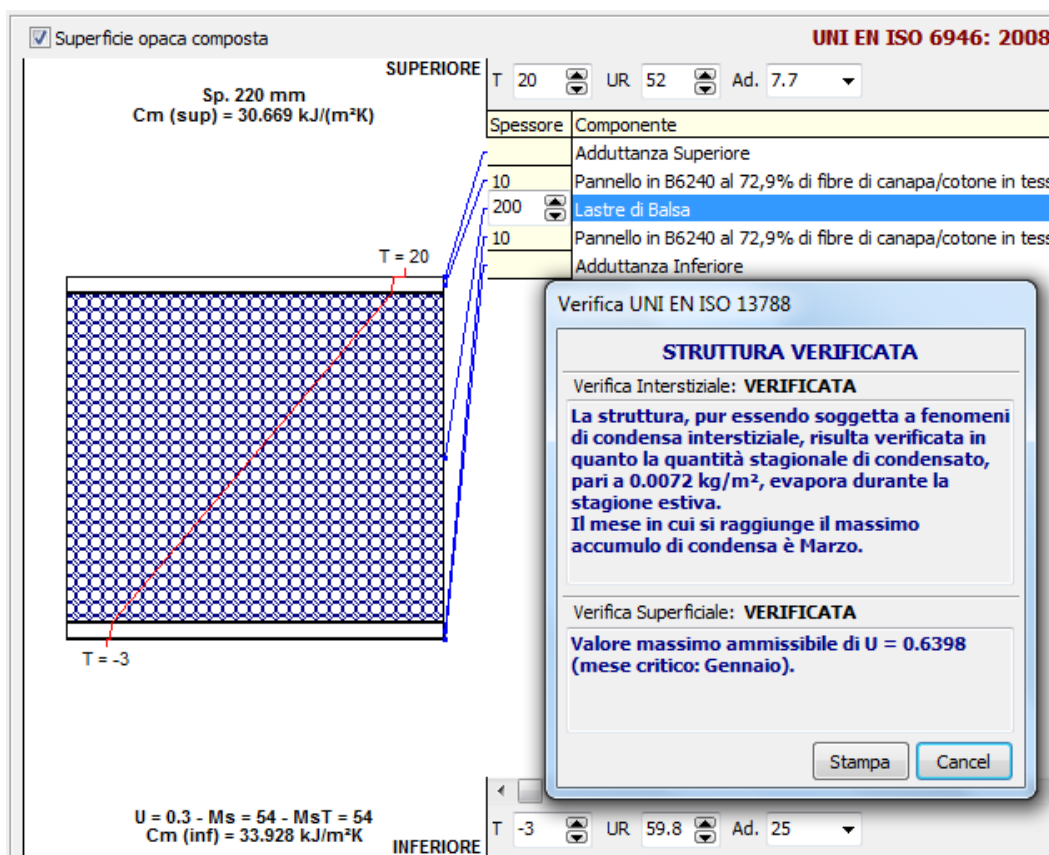



***Fig. 4.154*** *Verifica igrometrica del pannello sandwich ottimale di chiusura orizzontale superiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti B6240C*

**Codice Struttura:** B6240C
**Descrizione Struttura:** -

| N. | DESCRIZIONE STRATO (da superiore a inferiore) | s [mm] | lambda [W/mK] | C [W/m²K] | M.S. [kg/m²] | P<50*10¹² [kg/msPa] | C.S. [J/kgK] | R [m²K/W] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Adduttanza Superiore | 0 | | 5.900 | | | 0 | 0.169 |
| 2 | Pannello in B6240 al 72,9% di fibre di canapa/cotone in tessuto B6240 | 10 | 0.571 | 57.100 | 11.59 | 0.019 | 1645.5 | 0.018 |
| 3 | Lastre di Balsa | 200 | 0.064 | 0.320 | 31.00 | 26.000 | 2386 | 3.125 |
| 4 | Pannello in B6240 al 72,9% di fibre di canapa/cotone in tessuto B6240 | 10 | 0.571 | 57.100 | 11.59 | 0.019 | 1645.5 | 0.018 |
| 5 | Adduttanza Inferiore | 0 | | 25.000 | | | 0 | 0.040 |

| | | |
|---|---|---|
| RESISTENZA = 3.370 m²K/W | CAPACITA' TERMICA AREICA (sup) = 29.115 kJ/m²K | TRASMITTANZA = 0.297 W/m²K |
| SPESSORE = 220 mm | CAPACITA' TERMICA AREICA (inf) = 33.805 kJ/m²K | MASSA SUPERFICIALE = 54 kg/m² |
| TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA = 0.11 W/m²K | FATTORE DI ATTENUAZIONE = 0.37 | SFASAMENTO = 9.84 h |

s = Spessore dello strato; lambda = Conduttività termica del materiale; C = Conduttanza unitaria; M.S. = Massa Superficiale; P<50*10¹² = Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50%; C.S. = Calore Specifico; R = Resistenza termica dei singoli strati; Resistenza - Trasmittanza = Valori di resistenza e trasmittanza reali; Massa Superficiale = Valore calcolato come disposto nell'Allegato A del D.Lgs.192/05 e s.m.i..

| | Ts [°C] | Pss [Pa] | Prs [Pa] | URs [%] | Ti [°C] | Psi [Pa] | Pri [Pa] | URi [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DIAGRAMMI DELLE PRESSIONI | 20.0 | 2 337 | 1 168 | 50.0 | -3.0 | 475 | 284 | 59.8 |

Ts = Temperatura superiore; Pss = Pressione di saturazione superiore; Prs = Pressione relativa superiore; URs = Umidità superiore; Ti = Temperatura inferiore; Psi = Pressione di saturazione inferiore; Pri = Pressione relativa inferiore; URi = Umidità inferiore.

**VERIFICA IGROMETRICA**

| | gen | feb | mar | apr | mag | giu | lug | ago | set | ott | nov | dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| URcf1 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 |
| Tcf1 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 |
| URcf2 | 81.50 | 72.70 | 61.00 | 55.40 | 68.40 | 44.50 | 46.00 | 39.90 | 55.60 | 68.50 | 86.50 | 87.70 |
| Tcf2 | 4.50 | 5.10 | 7.10 | 10.70 | 14.90 | 20.60 | 23.90 | 23.20 | 19.90 | 14.50 | 9.80 | 6.40 |

| | | |
|---|---|---|
| **Verifica Interstiziale** | VERIFICATA | La struttura, pur essendo soggetta a fenomeni di condensa interstiziale, risulta verificata in quanto la quantità stagionale di condensato, pari a 0.0072 kg/m², evapora durante la stagione estiva. Il mese in cui si raggiunge il massimo accumulo di condensa è Marzo. |
| **Verifica Superficiale** | VERIFICATA | Valore massimo ammissibile di U = 0.6398 (mese critico: Gennaio). |

La verifica igrometrica è stata eseguita secondo UNI EN ISO 13788.

cf1 = vano interno

cf2 = Esterno

***Fig. 4.155*** *Verifica igrometrica del pannello sandwich ottimale di chiusura orizzontale superiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti B6240C*

Il pannelli sandwich con i laminati rinforzati con tessuti Biotex, a differenza di quelli in Mat, B607 e B6240C, sono stati progettati ottimizzando il peso, quindi la massa superficiale, nel rispetto dello stato tensionale ammissibile e degli abbassamenti imposti dalla normativa.

***Tab. 4.37*** *Progetto e verifica dei pannelli sandwich di chiusura orizzontale inferiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti Biotex*

| Spessore pelle esterna (laminati) [mm] | 10 | 5 | 5 | 5 | 2 |
|---|---|---|---|---|---|
| Spessore balsa [mm] | 130 | 140 | 90 | 40 | 46 |
| Spessore sandwich [mm] | 150 | 150 | 100 | 50 | 50 |
| Wmax/b [%] | 0,155 | 0,214 | 0,208 | 0,202 | 0,254 |
| Limite [%] | 0,400 | | | | |
| Status verifica | SI | SI | SI | SI | SI |
| Status verifica tensioni | SI | SI | SI | SI | SI |
| Massa superficiale [kg/m$^2$] | 44,5 | 33,9 | 26,1 | 18,4 | 12,0 |

***Tab. 4.38*** *Progetto e verifica dei pannelli sandwich di chiusura orizzontale superiore utilizzando laminati rinforzati con tessuti Biotex*

| Spessore pelle esterna (laminati) [mm] | 5 | 5 | 5 | 5 | 2 |
|---|---|---|---|---|---|
| Spessore balsa [mm] | 240 | 190 | 90 | 40 | 46 |
| Spessore sandwich [mm] | 250 | 200 | 100 | 50 | 50 |
| Wmax/b [%] | 0,428 | 0,420 | 0,404 | 0,397 | 0,505 |
| Limite [%] | 0,500 | | | | |
| Status verifica | SI | SI | SI | SI | NO |
| Status verifica instabilità assiale | SI | SI | SI | SI | SI |
| Status verifica tensioni | SI | SI | SI | SI | SI |
| Massa superficiale (peso sandwich) [kg/m$^2$] | 49,4 | 41,6 | 26,1 | 18,4 | 12,0 |

***Fig. 4.156*** *Prototipi di pannelli sandwich in laminato con tessuti Biotex e balsa, realizzati in un solo step di iniezione con il processo Bag Molding*

Lo studio sperimentale condotto si è concluso con l'individuazione delle configurazioni ottimali, per ciascuna tipologia di laminato, per i pannelli sandwich di chiusura orizzontale inferiore (solaio di calpestio) e superiore (copertura), come sintetizzato nelle seguenti tabelle.

***Tab. 4.39** Configurazioni ottimali per i pannelli sandwich di chiusura orizzontale inferiore*

| | MAT | B607 | B6240C |
|---|---|---|---|
| Spessore pelle esterna (laminati) [mm] | 10 | 10 | 10 |
| Spessore balsa [mm] | 180 | 180 | 180 |
| Spessore sandwich [mm] | 200 | 200 | 200 |
| Wmax/b [%] | 0,225 | 0,157 | 0,159 |
| Trasmittanza termica U [W/mk] | 0,326 | 0,331 | 0,331 |
| Fatt.attenuazione $f_a$ | 0,43 | 0,44 | 0,45 |
| Trasm.Ter.period.γ [W/m$^2$K] | 0,14 | 0,14 | 0,15 |
| Sfasamento [h] | 8,97 | 8,84 | 8,72 |
| Massa superficiale [kg/m$^2$] | 50,7 | 52,8 | 51,9 |

***Tab. 4.40** Configurazioni ottimali per i pannelli sandwich di chiusura orizzontale superiore*

| | MAT | B607 | B6240 C |
|---|---|---|---|
| Spessore pelle esterna (laminati) [mm] | 10 | 10 | 10 |
| Spessore balsa [mm] | 200 | 200 | 200 |
| Spessore sandwich [mm] | 220 | 220 | 220 |
| Wmax/b [%] | 0,42 6 | 0,296 | 0,301 |
| Trasmittanza termica U [W/mk] | 0,29 6 | 0,300 | 0,300 |
| Fatt.attenuazione $f_a$ | 0,36 | 0,37 | 0,37 |
| Trasm.Ter.period.γ [W/m$^2$K] | 0,10 | 0,11 | 0,11 |
| Sfasamento [h] | 10,0 8 | 9,95 | 9,84 |
| Massa superficiale (peso sandwich) [kg/m$^2$] | 52,2 | 55,9 | 55,0 |

## 4.6 CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi si colloca all'interno del settore di ricerca sui materiali compositi polimerici innovativi rinforzati con fibre naturali di origine vegetale.

Lo studio ha dimostrato come l'utilizzo di fibre naturali di origine vegetale, per il rinforzo di compositi a matrice epossidica, rappresenti una possibilità vantaggiosa e percorribile per le applicazioni semi-strutturali.

I tessuti di fibre vegetali ad orientazione preferenziale (tessuti bidirezionali quali il B607, B6240C e Biotex) possono incrementare notevolmente le proprietà meccaniche dei laminati, rispetto all'utilizzo dei tessuti non tessuti di fibre disposte ad orientazione random (Mat), determinando, a parità di caratteristiche meccaniche del laminato, una notevole riduzione dello spessore e, quindi, della densità del composito.

I trattamenti superficiali con soda caustica NaOH e amminosilano A1100 della Sigma-Aldrich applicati alle fibre vegetali del tessuto Mat, B607 e B6240C hanno determinato un apporto significativo all'incremento delle proprietà meccaniche dei compositi, grazie alle modifiche strutturali e alla migliore compatibilità con la matrice epossidica delle fibre. Occorre tuttavia selezionare e adottare con cautela tali trattamenti in relazione al rapporto benefici-costi e alla sostenibilità ambientale.

I modelli previsionali di Cox-Krenchel e Madsen, applicati a partire sia dai dati di letteratura sulle singole fibre che da quelli sperimentalmente ottenuti sui filati, forniscono una stima approssimata dei parametri meccanici delle lamine in composito. Infatti, il comportamento meccanico dei filati allo stato “secco” è notevolmente differente dallo stato “reticolato”, ossia la circostanza in cui i filati sono inseriti nella struttura del composito. Per tale ragione, per potere applicare i modelli previsionali ed avere una stima significativa dal punto di vista progettuale, è necessario condurre una campagna sperimentale di produzione di laminati con la tipologia di tessuto prescelto, determinare le caratteristiche meccaniche e ottenere attraverso la formulazione inversa dei modelli (Back Calculation) i parametri meccanici dei filati all'interno del composito. Utilizzando tali parametri si ottengono stime significative e credibili delle proprietà meccaniche di un qualunque laminato al variare della percentuale in volume dei componenti.

Entrambi i processi produttivi adottati (RTM e Bag Molding-Hot Press Curing) si sono rivelati adeguati alla realizzazione di laminati in composito con elevate caratteristiche meccaniche e di finitura superficiale. Tuttavia il Bag Molding, seguito da una fase di reticolazione in pressa, ha permesso di raggiungere percentuali in volume di rinforzo prossime al limite teorico raggiungibile e nettamente superiori (circa il 25%) rispetto al RTM. Ulteriore differenza sta nella percentuale in volume dei vuoti che grazie alla compattazione in pressa risulta significativamente inferiore e limitata alla solo porosità intrinseca delle fibre (lumen).

L'effetto dell'incremento della pressione di compattazione dei tessuti si evidenzia con l'incremento della percentuale in volume di rinforzo, ma oltre una certa sogli di $v_f$ si osserva un livellamento delle proprietà meccaniche a causa della secchezza crescente dei tessuti dovuta alla difficoltà della resina di penetrare nelle intercapedine. Questo impedisce un efficiente trasferimento dei carichi tra le fibre.

Tutti i sistemi laminati sviluppati possono essere combinati con il legno pressato di balsa per realizzare pannelli sandwich a basso peso specifico, ma con caratteristiche meccaniche e termiche tali da poter essere impiegati come elementi di chiusura orizzontale inferiore e superiore in edilizia residenziale.

# BIBLIOGRAFIA

[1] Marchetti M., Cutolo D., Tecnologie dei materiali compositi, editoriale ESA Milano 1991

[2] Bruckner S., Allegra G., Pegoraro M., La Mantia F.P., Scienza e tecnologia dei materiali polimerici, EdiSES Napoli 2001

[3] Ciampaglia G., Tecnologia dei materiali compositi meccanici ed aeronautici, IBN Editore Roma 2003

[4] William D.Callister, Scienza e tecnologia dei materiali, una introduzione, EdiSES, 2002

[5] I.K.Varma, V.B.Gupta, Thermosetting Resin Properties, Volume 2; (ISBN: 0-080437206); pp. 1±56, IIT, Delhi, India.

[6] F.A.Cassis, R.C.Talbot, Polyester and vinyl ester resins, in "Handbook of Composites", Ed.Chapman & Hall, seconda edizione, cap.2 .

[7] A. Vazquez, V. Dominguez, J.M. Kenny, J. Thermoplast.Compos., 1999, 12, 477.

[8] X. Chen, Q. Guo, Y. Mi, J. Appl. Polym. Sci., 1998**,** 69, 1891.

[9] H. Takagi, S. Oschi, High Performance Structure and Materials II, 2004, Editori C.A. Brebbia and W.P. de Wilde, WIT, Press Southampton, Boston.

[10] V. Cyras, S. Iannace, J. Kenny, A. Vazquez, Polym.Compos., 2001**,** 22, 104.

[11] J.M. Mayer, D.L. Kaplan, TRIP, 1994**,** 7, 227.

[12] H. Updegraf, in `Encyclopedia of Polymer Science and Engineering', eds. N. M. Bikales, C. G. Overberger and G. Menges, Wiley, New York, 1986.

[13] V.V.Vasiliez, E.V.Morozov, Mechanics and Analysis of composite materials, Ed.Elsevier, 2001, p.6, 17.

[14] D. Gay, S. V. Hoa, S.W. Tsai Composite Materials: Design and Applications, CRC Press, Boca Raton, 2003.

[15] L. A. Berglund in S.T. Peters, ed., Handbook of composites, Chapman & Hall, London, 1998, pp.115-130.

[16] A.M.M  Baker and J. Mead in C.A. Harper, Handbook of Plastics, Elastomers and Composites, McGraw Hill, 2004, , pp.1-108.

[17] A.B. Strong, Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications, Society of Manufacturing Engineering, Dearborn, 1989.

[18] H. Q. Pham and M. J. Marks Epoxy Resins. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley, 2005, pp.678-804

[19] L.Boogh, R.Mezzenga, *"Principles of Thermoset Processing"* in *Comprehensive Composites Materials*, Vol. 2 Ed. by A. Kelly and C. Zweben, Pergamon, Oxford, 2000

[20] Forst, Sullivan, *Biodegradable Polymers in North America & Europe*", July 1998, MarTech, New York.

[21] U. Riedel, J. Nickel, "Biocomposites: State-of-the-Art and Future Perspectives," in *7*th International Conference on Wood Plastic Composites, Madison, WI, May 19–20 2003.

[22] R.D. Hagenmaier, P.E. Shaw, J. Agric. Food. Chem., 1990, 38, 1799.

[23] A.K.Mohanty, M.Misra, G.Hinrichsen, Macromol. Mater. Eng., 2000, 276/277, 1.

[24] S. Luo, A.N. Netravali, Polym. Compos., 1999, 20, 367.

[25] A.K.Mohanty, M.A.Khan, S.Sahoo, G.Hinrichsen, J. Mater. Sci., 2000, 35, 2589.

[26] T.Furukawa, Y.Matsusue, T.Yasunaga, Y.Shikinami, M.Okuno, T.Nakamura, Biomaterials, 2000, 21, 889.

[27] Z.Xia, W.A.Curtin, T.Okabe, Compos. Sci. Technol., 2002, 62, 1279.

[28] A.K. Mohanty,  M.A.G. Hinrichsen, Compos. A, 2000, 31, 143.

[29] A.K.Bledzki, J.Gassan  Prog. Polym. Sci. 1999, 24, 221.

[30] D.Nabi Saheb, J.P.Jog Advances in Polymer Technology 1999, 18, 351.

[31] W.G.Glasser, R.Taib, R.K.Jain, R.Kander J. Appl. Polym. Sci. 1999, 73, 1329.

[32] Y.Li, Y.W.Mai, L.Ye Composites Sciences and Technology 2000, 60, 2037.

[33] S.J.Eichhorn, C.Baillie, L.Y.Mwaikambo, A.Dufresne, K.M.Entwistle, P.J.Herrera-Franco, L.Groom, M.Hughes, T.G.Rials, P.M.Wild J. Mater. Sci. 2001, 36, 2107.

[34] J.George, J.Ivens, I.Verpoest *Die Angew. Makrom. Chem* 1999, *272*, 41.

[35] D.G. Hepworth, J.F.V. Vincent, G.Jeronimidis, D.M.Bruce *Composites Part A* 2000, *31*, 599.

[36] D.G. Hepworth, R.N.Hobson, D.M.Bruce, J.W.Farrent *Composites Part A* 2000, *31*, 1279.

[37] R.Karnani, M.Krishnan, R.Narayan Polym. Eng. Sci. 1997, 37, 476.

[38] T.Peijs, S.Garkhail, R.Heijenrath, M.van den Oever, H.L.Bos Macromol. Symp. 1998, 127, 193.

[39] R.M.Rowell, D.F.Caulfield, G.Chen, W.D.Ellis, R.E.Jacobson, S.E.Lange, R.Schumann, A.R.Sanadi, J.J.Balatinecz, M.Sain "Recent advances in agrofiber/thermoplastic composites" 1998, p.11.

[40] T.Corbière-Nicollier, B.Gfeller Laban, L.Lundquist, Y.Leterrier, J.-A. E.Manson, O.Jolliet Resources, Conservation and Recycling 2001, 33, 267.

[41] S.V.Joshi, L.T.Drzal, A.K.Mohanty, S.Arona Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2004.

[42] Jan E.G. van Dam Wageningen Environmental benefits of natural fibre production and use Proceedings of the Symposium on Natural Fibres Rome 20 October 2008.

[43] www.me.gatech.edu/jonathan.colton/me4793/natfiber.pdf - Georgia Institute of Technology

[44] SachsenLeinen; Daimler 1999; BAFA; NOVA; AVB; CELC; REO

[45] ACMC Advanced Composites Manufacturing Centre – University of Plymouth

[46] Williams et als., 2000; Bogoeva-Gaceva et als., 2007

[47] R. Umer, S. Bickertona, and A. Fernyhough: The effect of yarn length and diameter on permeability and compaction response of flax fibre mats

[48] Natural fibre properties, in Natural fibre'09 Proceedings (University of Bath) London (UK)

[49] E. Sparnins, Mechanical Properties of Flax Fibers and Their Properties, Ph.D. Thesis, Lulea University of Technology (2006).

[50] Le Troedec M., Sedan D., Peyratout C., Bonnet J.P., Smith A., Guinebretiere R., Gloaguen V., Krausz P., Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres, Composits-Part A: applied science and manufacturing, 39: 514-522, 2008.

[51] Sgriccia N., Hawley M.C., Misra M., Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites, , Composits- Part A: applied science and manufacturing, 39: 1632-1637, 2008.

[52] Aziz S.H., Ansell M. P., The effect of alkanization and fibre alignment on the mechanical and thermal properties of kenaf and hemp bast fibre composites: Part 1 – polyester resin matrix, Composites Science and Technology, 64: 1219-1230, 2004.

[53] Andersons J., Sparnins E., Joffe R., Stiffness and Stregth of Flax Fiber/Polymer Matrix Composites, Polymer Composites, vol.27, issue 2, 221-229, 2006.

[54] Kalia S., Kaith B.S., Kaura I., Pretreatments of Natural Fibers and their Application as Reinforcing Material in Polymer Composites – A Review, Polymer Engineering and Science, vol.49, issue 7, 1253-1272, 2009.

[55] M.J.John, B.Francis, K.T. Varughese, S.Thomas, Effect of chemical modification on properties of hybrid fiber biocomposites, Composites: Part A – Applied Science and Manufacturing, 39: 352-363, 2008.

[56] Soo-Jin Park, Joong-Seong Jin, Effect of Silane Coupling Agent on Interphase and Performance of Glass Fibers/unsaturated Polyester Composites, Journal of Colloid and Interface Science Vol. 242, Issue 1, 174-179, 2001.

[57] Li Hu, Yizao Wana, Fang He, H.L. Luo, Hui Liang, Xiaolei Li and Jiehua Wang, Effect of coupling treatment on mechanical properties of bacterial cellulose nanofibre-reinforced UPR ecocomposites, Materials Letters 63: 1952–195, 2009.

[58] Rodriguez E.S., Stefani P.M., Vazquez A., Effects of Fibers'Alkali Treatment on the Resin Transfer Moulding Processing and Mechanical Properties of Jute-Vinylester Composites, Journal of Composite Materials, Vol. 41, No. 14/2007

[59] Norma CNR-DT200/2004

[60] S. Goutianos, T. Peijs, B. Nystrom and M. Skrifvars Appl Compos Mater 13 (2006) 199–215.

[61] MAFF, “The Use of Naturals Fibers in Nonwoven Structures for Applications as Automotive Component Substrates”, NF0309, 2003.

[62]R.M.Rowell “Opportunities for composites from agro-based resources”, Capitolo 7, Ed.Rowell, R.M., Young, R.A., and Rowell, J.K., CRC press-Lewis Publishers, Boca Raton, 1996, p.249

[63]M.Wollerdorfer, H.Bader Industrial Crops and Products 1998, 8, 105.

[64] A.K.Mohanty, M.Misra, G.Hinrichsen Macromolecular Materials and Engineering 2000, 276-277, 1.

[65] K.Oksman, M.Skrifvars, J.F.Selin Composite Science and Technology 2003, 63, 1317

[66] A.K.Mohanty, A.Wibowo, L.T.Drzal Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2004, 35, 363.

[67] M.Karus “European Hemp Industry: Cultivation, Processing, and Product Lines” in Journal of Industrial Hemp, Volume 7, Number 2, 2002, 95-99.

[68] M.Karus, M.Kaup Naturfasereinsatz in der europäischen Automobilindustrie. Technische Textilien, Jhrg. 44, 11/2001, 258-262.

[69] M.Karus, M.Kaup Natural Fibres in the European Automotive Industry. Journal of Industrial Hemp, Volume 7, Number 1, 2002, 119-131.

[70] G.I. Williams, R.P. Wool, Appl.Compos. Mater., 2000, 7, 421

[71] G.Bogoeva-Gaceva, M.Avella, M.Malinconico, A.Buzarovska, A. Grozdanov, G.Gentile, M.E.Errico, Natural Fiber Eco-Composites, Polymer Composites, 2007, DOI 10.1002/pc.

[72] K.Joseph, L.H.C.Mattoso, R.D.Toledo, S.Thomas, L.H.Carvalho, L.Pothen, S.Kala, B.James, “Natural Fiber Reinforced Composites” in Natural Polymers and Agrofibers Composites, Editori: E.Frallini, A.L.Leao, L.H.C. Mattoso. San Carlos, Brazil, Embrapa, 2000,159.

[73] L.Y.Mwaikambo, M.P.Ansell, Hemp fibre reinforced cashew nut shell liquid composites, Composites Science and Technology 2003, n.63.

[74] A.K.Bledzki, J.Gassan, Composites reinforced with cellulose based fibres, Progress in Polymer Science 1999, n.24, 221–274.

[75] P.Malnati, Composites Technology August 2010 http://www.compositesworld.com/ articles/

interior - innovation - the - value - proposition.

[76] G.Cicala, G.Cristaldi, A.Latteri e G.Recca "Compositi rinforzati con fibre di canapa: tessuti

a base di fili ritorti" 1° Convegno Nazionale Assocompositi, 25-26 Maggio 2011, Milano.

[77] Tillman U. Gerngross, Steven C. Slater, How Green are Green Plastics, Scientific American, August 2000, pp 37-41.

[78] Erwin T.H. Vink, David A. Glassner, Jeffrey J. Kolstad, Robert J. Wooley, Ryan P. O'Connor, The eco-profiles for current and near-future NatureWorks® polylactide (PLA) production, Industrial Biotechnology, Spring 2007, pp 58-81.

[79] http://www.eurekamagazine.co.uk

[80] http://www.ilvolo.net/scat_aer_ing_mosquito.htm.

[81] http://www.portalecompositi.it

[82] Singh B., Manorama Gupta, Anchal Verma, Mechanical behaviour of particulate hybrid composite laminates as potential building materials, Construction and Building Materials, vol.9, No.1, pp.39-44, 1995.

[83] Mechanics and Analysis of Composite Materials Valery - V. Vasiliev, Evgeny I.Morozov

Elsevier, 2001

[84] Mechanics of composites structures – Laslo P.Kollar, George S.Springer, Cambridge University Press, 2003

[85] A. El-Sabbagh, I. Taha ,L. Steuernagel, G. Ziegmann, Stiffness and Strength of Thermoplastic Composites Reinforced with Natural Fibers: Modelling and Experimentation of PP/Flax, Institute for Polymer Materials and Plastic Processing; Agricolastrasse 6; 38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany.

[86] A. El- Sabbagh, L. Steuernagel, G. Ziegmann, Processing and Modeling of the Mechanical Behavior of Natural Fiber Thermoplastic Composite: Flax/Polypropylene, Polymer Composites 2009

[87] Madsen B., Thygesen A., Lilholt H., Plant fibre composites – porosity and stiffness, Composites Science and Technology, 69:1057-1069, 2009.

[88] Bo Madsen, Preben Hoffmeyer, Anne Belinda Thomsen, Hans Lilholt – *hemp yarn reinforced composites – yarn characteristics,* Composites Science and Technology, 67 (2007) 1584-1600.

[89] Bo Madsen, Preben Hoffmeyer, Hans Lilholt - Hemp yarn reinforced composites – II tensile properties, Composites: Part A 38 (2007) 2204–2215

[90] Madsen B., Lilholt H., Physical and mechanical properties of unidirectional plant fibre composites – an evaluation of the influence of porosity, Composites science and technology, 63: 1265-1272, 2003.

[91] Madsen B. Properties of plant fibre yarn polymer composites – an experimental study. Ph.D. Thesis. Technical University of Denmark, Denmark, 2004, Series R, No. 82.

[92] K. Murali Mohan Rao, K. Mohana Rao, A.V. Ratna Prasad, Fabrication and testing of natural fibre composites: Vakka, sisal, bamboo and banana, Materials and Design

[93] Cicala G., Cristaldi G., Recca G., Ziegmann G., El-Sabbogh A., Dickert M., Properties and performance of various hybrid glass/natural fibre composites for curved pipes, (DMFCI) Università di Catania, e (PUK) Clausthal-Zellerfeld, Germania, Elsevier, Materials and Design 30(2009) 2538-2542

[94] M. Ward, `Mechanical Properties of Solid Polymers, Wiley, Chichester, UK, 1983.

[95] H.Y.Jeon, S.H.Kim, Y.I.Chung, H.K.Yoo, J.Mlynarek Polymer Testing 2003, 22, 779.

[96] H.Altenbach, J.Altenbach, W.Kissing "Mechanics of Composite Structural Elements", Ed.Springer, 2000.

[97] Kevin P. Menard - Dynamic Mechanical Analysis, CRC press Boca Raton London 1999

[98] Robert Byron; Warren E. Stewart; Edwin N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, 2a ed., New York, Wiley, 2005.

[99] Frank P. Incropera; David P. DeWitt; Theodore L. Bergman; Adrienne S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6a ed., Wiley, 2006

[100] Wambua, J. Ivens and I. Verpoest, Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?, Compos Sci Technol 63 (9) (2003), pp. 1259–1264.